



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
FIRENZE

# Dottorato di Ricerca in Ingegneria Industriale

Ciclo XXVI

## **Analisi di classi di urti particolari: urti con mezzi a due ruote e tamponamenti a bassa velocità**

Settore Scientifico Disciplinare ING-IND/14

### **Candidato**

Dott. Carlo Cialdai

### **Tutore**

Prof. Dario Vangi

### **Controrelatore**

Ing. Marco Amendolagine

### **Coordinatore del dottorato**

Prof. Maurizio De Lucia

*Anni 2011/2013*



# Prefazione

Il lavoro di dottorato descritto nella seguente tesi è stato condotto integralmente presso il Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università degli studi di Firenze negli anni dal 2011 al 2013.

Oltre al laboratorio di Meccanica Sperimentale dove ho svolto l'attività di ricerca, vorrei ringraziare per il supporto avuto nella seconda parte del lavoro di tesi, il Dipartimento di Scienze Chirurgiche Specialistiche dell'Università di Firenze, che ha messo a disposizione un medico per la scelta dei muscoli da monitorare e un tecnico di laboratorio per l'utilizzo dell'elettromiografo.

Infine, oltre all'azienda EB-Neuro di Firenze che ha messo a disposizione parte della strumentazione, vorrei ringraziare tutti i volontari che si sono prestati a svolgere i test.





# Abstract

Nel lavoro descritto in questa tesi di dottorato sono state analizzate separatamente due classi di urti particolari, gli urti con mezzi a due ruote e i tamponamenti a bassa velocità, al fine di identificare modelli e procedure che consentano di analizzare con maggior attenzione queste tipologie di incidenti stradali favorendo una più verosimile, o più probabile, ricostruzione degli eventi.

Per l'attività condotta sui motoveicoli, viene presentata una analisi degli urti tra moto ed auto, con particolare attenzione al caso in cui il mezzo a due ruote venga coinvolto nella parte frontale, con accorciamento del suo passo. Il lavoro è focalizzato sulla valutazione dell'energia cinetica dissipata nell'impatto. Viene presentato un modello semi-empirico basato sullo studio di crash test di letteratura e su alcune campagne di prove condotte tra moto e barriera rigida. L'attenzione è inoltre focalizzata sulla ricerca di una formulazione empirica della velocità relativa che tenga in considerazione la presenza del conducente del motoveicolo al momento dell'impatto. I crash test tra auto e moto, svolti con e senza conducente del mezzo a due ruote, mettono in evidenza buone stime sia dell'energia cinetica sia della velocità relativa calcolate con i modelli sviluppati.

Nei tamponamenti a bassa velocità, è stata utilizzata l'elettromiografia con lo scopo di comprendere se le condizioni dei soggetti umani sottoposti ai test siano paragonabili a quelle tipiche di qualche fase di guida reale e dunque di attestare l'utilità dei crash test per lo studio del colpo di frusta e la definizione di soglie di danno. E' stata monitorata l'attività muscolare di 9 soggetti durante test di guida su strada e durante prove di tamponamento a bassa velocità. I test di guida sono stati svolti su un percorso urbano con traffico moderato e che comprendeva alcune delle situazioni in cui è probabile essere coinvolti in un tamponamento: guida a velocità costante, decelerazione, frenata improvvisa, attesa al semaforo. Gli stessi guidatori sono poi stati sottoposti ad urti di tamponamento a bassa velocità fra veicoli; sono stati effettuati 36 crash test di due tipi (con soggetti consapevoli e inconsapevoli) e con due velocità di impatto nominali (6 e 8 km/h). I test di guida hanno confermato che diverse condizioni di guida comportano diversi gradi di attivazione muscolare, con la frenata decisa che di solito produce i valori più alti. Durante i test di tamponamento sono state osservate solo piccole differenze fra i soggetti consapevoli ed inconsapevoli.



# Indice

Introduzione .....	11
PARTE I: URTI CON MEZZI A DUE RUOTE .....	15
1 Fase post urto .....	17
1.1 Analisi della fase post urto .....	18
1.1.1 Moto del conducente.....	24
2 Fase di urto .....	27
2.1 Analisi della fase d'urto.....	27
2.2 Modelli impulsivi.....	27
2.2.1 Modello ad un grado di libertà .....	29
2.2.2 Modello a due gradi di libertà .....	40
2.3 Metodi di valutazione dell'energia di deformazione.....	45
2.4 Energia cinetica dissipata dal motoveicolo .....	48
2.4.1 Analisi critica dei dati di letteratura.....	53
2.4.2 Integrazione dei dati di letteratura tecnica .....	61
2.5 Energia cinetica dissipata dall'autoveicolo .....	77
2.5.1 Correzione dell'energia cinetica dissipata dall'autoveicolo .....	85
2.6 Validazione mediante prove sperimentali .....	86
2.6.1 Prova auto-moto senza motociclista .....	88
2.6.2 Risultati delle prove .....	98

3	Fase pre-urto .....	103
3.1	Analisi della fase pre-urto .....	103
3.1.1	Velocità relativa nell'urto con 2 corpi: auto e moto.....	105
3.1.2	Velocità relativa nell'urto con 3 corpi: auto, moto e motociclista	106
3.1.3	Simulazione numerica in ambiente LabVIEW .....	110
3.2	Validazione con prove sperimentali .....	116
3.2.1	Prove auto-moto con conducente.....	118
3.2.2	Analisi dei risultati.....	126
3.2.3	Riscontro con crash test di letteratura .....	129
	PARTE II: TAMPONAMENTI A BASSA VELOCITÀ.....	133
4	Il colpo di frusta cervicale.....	135
4.1	Risposta cinematica degli occupanti.....	138
4.2	Le possibili cause di lesione.....	139
4.3	Injury criteria: NIC.....	140
4.3.1	Parametri del veicolo .....	143
4.3.2	Tipologia di urto.....	147
4.3.3	Occupante .....	150
4.4	Approccio classico per la stima delle sollecitazioni dell'occupante .....	151
4.5	Utilizzo del dato della scatola nera per la stima delle sollecitazioni dell'occupante.....	154
4.5.1	Qualità del dato acquisito dalla scatola nera: prove di caratterizzazione. ....	156
5	Stato di attivazione muscolare durante le prove di tamponamento su volontari	171
5.1	L'elettromiografia di superficie .....	172
5.2	Test su volontari: materiali e metodi.....	173
5.2.1	Prove di guida .....	175
5.2.2	Prove di tamponamento .....	179
5.3	Analisi dei dati dei test su volontari .....	187

---

5.4	Discussione delle prove di guida .....	192
5.4.1	Intensità dell'attivazione muscolare durante la guida .....	192
5.4.2	Confronto tra la velocità del veicolo e lo stato di attivazione muscolare.....	196
5.4.3	Confronto tra l'utilizzo dell'auto propria e quella del test .....	198
5.5	Discussione delle prove di tamponamento.....	200
5.5.1	Confronto tra soggetto consapevole e inconsapevole .....	200
5.5.2	Crash test ripetuti .....	206
5.5.3	Severità di impatto.....	206
5.5.4	Analisi degli spostamenti .....	209
6	Conclusioni .....	213
7	Indice delle figure .....	217
8	Indice delle tabelle.....	225
9	Bibliografia.....	227
	Appendice A .....	233
	Appendice B .....	243
	Appendice C .....	249
	Appendice D .....	255



# Introduzione

La ricostruzione degli incidenti stradali è nata in ambito giudiziario ed assicurativo, dove viene generalmente svolta a supporto dell'individuazione delle responsabilità penali dei soggetti coinvolti o per la valutazione delle azioni risarcitorie. In questo ambito, il compito di ricostruire la dinamica dell'incidente stradale risulta talvolta delicato e decisivo, coinvolgendo aspetti sociali ed economici, oltre che penali.

La ricostruzione degli incidenti gioca un ruolo essenziale anche nell'ambito dell'analisi e del miglioramento della sicurezza stradale, poiché permette di individuare e comprendere le cause ed i meccanismi degli incidenti, le modalità di deformazione dei veicoli, del funzionamento degli elementi di sicurezza passiva e attiva in condizioni reali, il comportamento e l'interazione uomo/veicolo/ambiente in condizioni critiche reali o in condizioni di mal funzionamento. Perciò la ricostruzione degli incidenti stradali costituisce il naturale sviluppo e completamento dell'analisi statistica del fenomeno incidentale e fornisce gli elementi necessari a finalizzare lo studio e la messa a punto di azioni mirate alla riduzione dei fattori di rischio e al miglioramento della sicurezza della circolazione stradale.

L'utilizzo di crash test al fine della raccolta di dati utili per la ricostruzione di incidenti stradali è divenuta col passare del tempo una pratica sempre più utilizzata per ricostruire la dinamica degli incidenti stradali; questa metodologia permette infatti, di valutare il comportamento dei veicoli in seguito alle varie tipologie di urto, realizzate ad hoc sulla base delle comuni modalità di sinistro, andando a rappresentare un vero e proprio termine di confronto per tutte le situazioni di urto che si verificano sulle strade. I dati raccolti nelle varie campagne di crash test, possono anche costituire un ottimo punto di partenza per la realizzazione di metodi sperimentali, che hanno come obiettivo la previsione e la stima dei parametri caratteristici dell'urto tra veicoli.

Lo studio delle prove di crash è fondamentale per la ricostruzione di un incidente stradale; negli incidenti è molto complesso risalire alle cause che lo hanno generato dalle tracce post-urto: esistono molteplici combinazioni, che

potrebbero portare alla situazione post-urto in esame. L'errata interpretazione della dinamica dei veicoli coinvolti, può portare alla realizzazione di un modello che non rispecchia in maniera adeguata lo svolgimento reale dell'urto. Al fine di non correre questo rischio, può risultare utile confrontare il danneggiamento dei veicoli coinvolti nel sinistro con database di riferimento, che mettono in relazione le deformazioni subite da un veicolo con le cause che le hanno generate.

Mentre negli urti che vedono coinvolti gli autoveicoli vi sono molteplici studi che forniscono modelli per la loro ricostruzione, negli urti nei quali sono coinvolti i motoveicoli, i pedoni e nei tamponamenti a bassa velocità, ad oggi non è stato ancora raggiunto un livello di conoscenza in grado di chiarire tutte le problematiche relative a questi tipi di sinistri. Questa classe di urti particolare è quindi oggetto di numerose ricerche volte a migliorare e colmare le lacune presenti e con lo scopo di fornire principi, modelli, e procedure che permettano al tecnico di individuare il succedersi più verosimile, o più probabile, degli eventi del sinistro.

L'attività di ricerca ha focalizzato l'attenzione solo su due dei tre urti particolari citati:

- Urti con motoveicoli;
- Tamponamenti a bassa velocità.

Per i primi si è pensato inizialmente di realizzare uno studio sul comportamento dei motoveicoli durante un urto frontale contro un autoveicolo, che avesse come obiettivo la stima dell'energia dissipata nella deformazione di entrambi i mezzi, a partire da un parametro valutabile in seguito all'urto: la riduzione del passo del motoveicolo.

Con questo scopo, è stata quindi realizzata inizialmente una serie di prove di crash test su motoveicoli di vario genere, eseguite tutte contro barriera rigida inamovibile e con velocità variabili. Per consentire la raccolta di una maggior quantità di dati, è stato deciso di far impattare alcuni di questi veicoli contro una barriera munita di una apposita strumentazione per la rilevazione delle forze scambiate durante l'urto; grazie a questa strumentazione è stato possibile svolgere un'analisi attenta della dinamica dell'urto, analizzando istante per istante l'andamento di tali forze, grazie anche al confronto parallelo con la documentazione video realizzata.

Una volta analizzate le prove di crash test, è stato eseguito un confronto con i dati di letteratura, per la realizzazione di un modello per la stima dell'energia di deformazione del motoveicolo, a partire dalle deformazioni riportate in seguito all'urto dal motoveicolo. Successivamente è stata proposta l'applicazione del metodo del Triangolo per la valutazione dell'energia cinetica dissipata dall'autoveicolo a partire dalla conoscenza della deformazione presente sull'auto e sull'accorciamento del passo della moto.



Il modello semi-empirico per la valutazione dell'energia globalmente dissipata proposto ha l'obiettivo di fornire un metodo di calcolo che, a differenza di quelli già presenti in letteratura, sia indipendente dalla zona dell'auto interessata dall'urto.

L'attività svolta sullo studio degli incidenti che coinvolgono i mezzi a due ruote si è successivamente spostata sullo studio della fase pre-urto, in particolare è stata cercata una relazione semplificata che permettesse di stimare la velocità relativa del motoveicolo, tramite la stima dell'energia di deformazione, nei casi in cui al momento dell'urto sia presente il motociclista sul proprio mezzo.

A causa dell'insufficienza dei dati sperimentali sono stati simulati numericamente svariati casi di urto tra auto e mezzi a due ruote tramite software LabView. I casi simulati, con masse e velocità consone agli attuali veicoli, sono stati analizzati tramite un modello impulsivo a due gradi di libertà in cui sono stati imposti gli angoli di impatto. Gli angoli post-urto, affetti da un certo grado di incertezza e variabilità hanno richiesto una simulazione MonteCarlo. Per ogni caso simulato è stata calcolata l'energia di deformazione dell'incidente e da questi è stato possibile verificare la velocità relativa di impatto impostata nella simulazione con la velocità calcolata in funzione dell'energia di deformazione.

A completamento dell'attività sui motoveicoli, sono stati effettuati alcune campagne di crash test tra auto e moto con e senza il dummy (che simula la presenza del motociclista), al fine di verificare le relazioni e i modelli trovati per la stima della velocità relativa e dell'energia cinetica dissipata nell'impatto.

Per quanto concerne l'attività condotta sulla classe di urti particolari dei tamponamenti a bassa velocità, l'attenzione si è focalizzata sul fenomeno che ne può conseguire per gli occupanti del mezzo tamponato: il colpo di frusta cervicale. Questo fenomeno è da molti anni un problema molto sentito da parte delle compagnie di assicurazioni, che giornalmente si trovano a dover valutare l'attendibilità di lamentati danni, conseguenza di impatti da tergo anche a bassa velocità. Seppur molto studiato, il fenomeno del colpo di frusta rimane tuttavia complesso, in quanto entrano in gioco molteplici fattori che contribuiscono alla probabilità di lesione al rachide. Tali fattori possono essere schematicamente raggruppati in tre gruppi: 1) il tipo di veicolo; 2) la tipologia di urto; 3) i parametri fisiologici dell'occupante (peso, struttura corporea, ecc.) e la tensione muscolare al momento del tamponamento.

Negli ultimi anni sono stati effettuati numerosi studi e campagne di prove sperimentali con test a bassa velocità su volontari con lo scopo di correlare le accelerazioni subite dal veicolo con le accelerazioni impresse alla testa e quindi alle lesioni lamentate, in modo da individuare dei valori di soglia sopra i quali viene lamentato il colpo di frusta.

Anche se tali studi hanno fatto chiarezza sulla dinamica del colpo di frusta e hanno fornito un valido aiuto per i tecnici, a causa della natura spiccatamente soggettiva della risposta a questo evento, legata alle differenti condizioni fisiche, di postura, di configurazione del sedile dell'auto e in particolare allo stato di tensione muscolare del soggetto coinvolto, i risultati ottenuti sono spesso soggetti a critiche. In particolare si criticano i risultati delle prove sperimentali su volontari, in quanto questi, sapendo di essere sottoposti a test, potrebbero assumere, anche involontariamente, posture o atteggiamenti difensivi, irrigidendo i muscoli della schiena e del collo tali da alterare i risultati della prova in termini di accelerazioni della testa.

L'attività di ricerca ha utilizzato l'elettromiografia di superficie (EMG) con l'obiettivo di valutare l'attività muscolare durante la guida normale, e confrontarla all'attività muscolare precedente al crash test di tamponamento a bassa velocità, con lo scopo di comprendere se le condizioni dei soggetti umani sono paragonabili a quelle tipiche di qualche fase di guida reale, attestando così l'utilità dei crash test per lo studio del colpo di frusta e la definizione di soglie di danno. Mediante elettromiografia è stata monitorata l'attività muscolare di 9 soggetti umani seduti nel posto del guidatore, durante test di guida su strada e durante prove di tamponamento a bassa velocità. Sono stati monitorati alcuni muscoli, scelti fra quelli interessati al fenomeno del colpo di frusta, insieme ad alcuni muscoli delle braccia e delle spalle, per valutare l'entità della presa sul volante. I test di guida sono stati svolti su un percorso urbano (lungo circa 5.5 km) con traffico moderato e che comprende alcune delle situazioni in cui è probabile essere coinvolti in un tamponamento: guida a velocità costante, decelerazione, frenata improvvisa, attesa al semaforo, etc. Gli stessi guidatori sono poi stati sottoposti ad urti di tamponamento a bassa velocità fra veicoli; sono stati effettuati 36 crash test di due tipi (con soggetti consapevoli e inconsapevoli) con due velocità di impatto nominali (6 e 8 km/h).

## **PARTE I: URTI CON MEZZI A DUE RUOTE**



# 1 Fase post urto

Nonostante la diversità tra gli urti che coinvolgono i veicoli a due ruote e quelli in cui sono coinvolti solo autoveicoli è sempre possibile individuare delle fasi tipiche, che possono essere affrontate separatamente nella ricostruzione: fase pre-urto, fase di urto e fase post-urto. In ciascuna delle suddette fasi i veicoli coinvolti nell'incidente sono soggetti a forze ed azioni diverse esercitate sia dall'ambiente esterno che dal conducente stesso attraverso manovre sui comandi del veicolo.

L'incidente stradale che vede coinvolto un motoveicolo si compone sostanzialmente delle fasi:

- Pre-urto
- Urto
- Post-urto

Concentrando l'attenzione sugli incidenti di motoveicoli, la fase di pre-urto è la fase temporale antecedente l'urto, e comprende il tempo intercorso tra la percezione di pericolo da parte del motociclista e l'urto stesso. Per caratterizzare la fase occorre fornire una descrizione dello scenario, del comportamento del guidatore, e un'opportuna schematizzazione dei corpi e mezzi coinvolti.

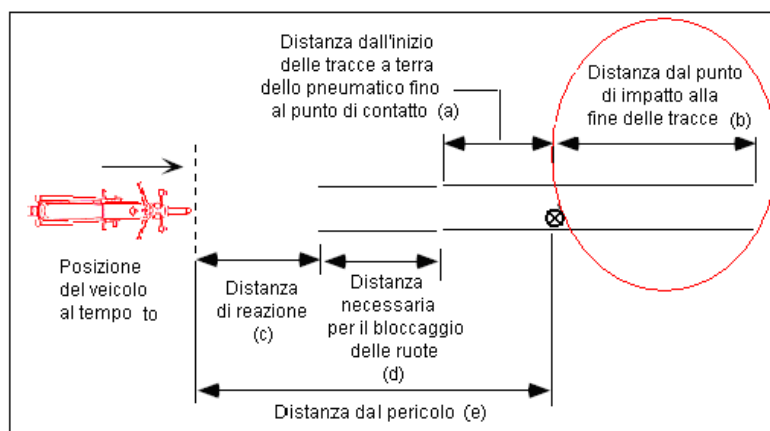


Figura 1.1 - Distanze percorse dal motoveicolo durante le fasi di pre-urto, urto e post-urto.

Lo spazio percorso dal motoveicolo durante il pre-urto (vedi figura 1.1) risulta la somma di più termini, tra cui la distanza percorsa nel tempo di reazione del guidatore (c), quella necessaria al bloccaggio delle ruote nella frenata (d), il tratto di frenata caratterizzato dalle tracce a terra dello pneumatico fino allo scontro (a).

La fase di urto (punto d'urto indicato da una x in figura 1.1) prevede il contatto tra i mezzi coinvolti, o tra i mezzi e uno o più elementi dello scenario.

La fase di post-urto va dalla fine dell'urto allo stato di quiete corrispondente all'arresto del motoveicolo.

## 1.1 Analisi della fase post urto

Come precedentemente detto, la fase post-urto è generalmente quella parte del sinistro che segue l'urto con altro veicolo. Il caso generale descritto non sempre si verifica: un incidente può manifestarsi anche in assenza di urto con un altro mezzo, o comunque con una barriera o un pedone. Il motoveicolo può perdere l'equilibrio, il motociclista essere sbalzato via, e il mezzo impattare il terreno senza che alcun elemento esterno interagisca con la moto stessa.

Indipendentemente dal tipo di urto che si verifica, o che esso si concretizzi o meno, lo studio della fase post-urto degli incidenti con motoveicoli pone l'attenzione all'intervallo temporale compreso tra l'istante precedente il contatto con il terreno e l'arresto del mezzo; ovvero la fase in cui si ha lo strisciamento sul fianco del veicolo.

Nel caso degli incidenti di motoveicoli la fase post-urto è caratterizzata dallo strisciamento del mezzo sul proprio fianco, conseguente alla caduta a terra, e quindi dalle tracce evidenti lasciate sull'asfalto.

Le ricerche riscontrabili in letteratura tecnica in merito allo studio della fase post-urto sono quasi tutte caratterizzate da una fase sperimentale che tende a riprodurre più o meno fedelmente alla realtà lo scarrocciamento del motoveicolo.

Reiss, Berger, Valette [1] hanno compiuto un'analisi approfondita sugli incidenti motociclistici, evidenziando caratteristiche e fattori di causa differenti da quelli automobilistici. In particolare i motoveicoli risultano più sensibili degli autoveicoli a condizioni avverse dello scenario (attraversamento animali, olio, acqua, ghiaia, foglie secche...), e a problemi meccanici. Una semplice foratura, ad esempio, può creare gravi conseguenze, mentre causa solo un po' d'ansia per un automobilista.

Il Traffic Safety Center dell'University of Southern California ha prodotto un'investigazione su circa 900 incidenti di motocicli, nei quali è stata rilevata una dipendenza predominante dai fattori umani [2]. Disattenzioni, alcol, comportamento spericolato, mancanza di esperienza sono le cause principali della casistica oggetto dell'indagine. Molti incidenti a veicolo singolo dimostrano l'importanza del mantenimento dell'equilibrio del mezzo, e la possibilità che questo venga a mancare per via di errori compiuti in frenata. Se il ciclista applica una coppia frenante troppo elevata, la ruota anteriore si blocca e slitta. Dal momento che l'aderenza dello pneumatico decade quando interviene il bloccaggio della ruota, la caduta è molto probabile. Questo evento è molto temuto dai motociclisti, che tendono ad essere riluttanti ad usare troppo il freno anteriore: una scelta assai inopportuna, in quanto esso fornisce un'ampia quota della decelerazione complessiva. Se si applica una coppia frenante eccessiva alla ruota posteriore, essa si blocca e slitta, provocando una perdita di aderenza del tutto simile a quella descritta in precedenza per l'anteriore. Il fenomeno è ancora più usuale nei modelli meno recenti di motoveicoli, e nella maggior parte degli scooter, in cui il freno a disco (capace di sviluppare una più accurata modulazione della frenata) è spesso presente soltanto sulla ruota anteriore. Tali conseguenze di controllo scorretto in decelerazione sono molto frequenti. La lettura dei dati collezionati dal Traffic Safety Center permette quindi di porre attenzione al fatto che semplici errori compiuti dal guidatore possono generare gravi conseguenze anche su incidenti che coinvolgono un solo veicolo, mentre per le auto casi simili avvengono più raramente.

In letteratura tecnica sono presenti relazioni e articoli in cui sono stati eseguiti test su motoveicoli, con il fine di studiarne il comportamento in strisciata. Il problema più evidente è quello di ricreare le condizioni più simili ad un incidente, in cui il veicolo cade a terra da posizione verticale usuale di marcia.

Innanzitutto occorre precisare che a differenza del caso di incidenti automobilistici, il passeggero nella fase post-urto viene generalmente sbalzato via, e assume un moto distinto dal mezzo. Questo permette di prescindere dalla presenza del motociclista, o di un dummy (sagoma tipo manichino per crush test) nell'esecuzione delle prove.

Le cause della perdita di controllo possono essere svariate, come precedentemente accennato, sia nel caso della presenza di un urto, sia nel caso in cui l'incidente sia a veicolo singolo e la caduta avvenga semplicemente nel tentativo da parte del motociclista di evitare il pericolo percepito. Ricostruire dunque una causa plausibile di impatto a terra risulta un'operazione complessa: le modalità di lancio adottate dagli sperimentatori sono varie, ma possono essere ricondotte a tecniche diverse di trascinamento del motociclo testato, tramite un carro o un mezzo trainante.

McNally e Bartlett [3], nella loro sperimentazione, si sono serviti di un'attrezzatura capace di sostenere la ruota anteriore del veicolo ad una certa distanza sopra il livello del terreno, mentre viene raggiunta la velocità desiderata.

Richard Lambourn [4] si è servito fondamentalmente di due modalità di lancio per i motoveicoli. La prima utilizza un'attrezzatura simile a quella utilizzata da McNally e Bartlett, e prevede il collegamento dei cavi al manubrio per poter gestire il momento del rilascio e obbligare il veicolo a cadere su un fianco piuttosto che sull'altro. La seconda è basata sulla realizzazione di una piattaforma di traino inclinata, sulla quale viene adagiato il mezzo già posto sul proprio lato. Il motoveicolo abbandona la piattaforma tramite il rilascio del sistema di funi che lo tratteneva, una volta raggiunta la velocità desiderata.

Medwell, McCarty e Shanahan [5] hanno usufruito di una particolare piattaforma montata sul lato di un camion, ad un'altezza molto bassa da terra, in modo che gli pneumatici risultassero elevati di circa 90 mm rispetto alla sede stradale. Il motoveicolo veniva tenuto in posizione eretta da un operatore posizionato sul cassone del camion stesso tramite dei cavi di sostegno (figura 1.2).



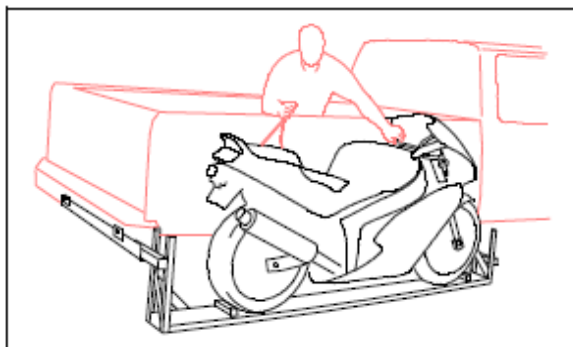


Figura 1.2 – Metodo di traino per motoveicolo per la sperimentazione di Medwell, McCarty e Shanahan.

Una volta raggiunta la velocità desiderata, i cavi venivano rilasciati, e il veicolo cadeva sul fianco.

Lo scopo di tutte le sperimentazioni descritte consisteva nell'osservare il comportamento in strisciata sul manto stradale, in seguito al distacco dal sistema di traino, e alla conseguente caduta a terra.

Per scongiurare la possibilità che il veicolo potesse inseguire il camion trainante anche in seguito allo sgancio, la maggior parte degli sperimentatori provvedeva a bloccare o a rallentare la ruota anteriore, contribuendo contemporaneamente a simulare l'azione di frenata.

Quando un motoveicolo cade a terra tipicamente si individuano tre fasi distinte che compongono il moto del mezzo [6]: 1) perdita del controllo, 2) impatto a terra e rimbalzi, 3) strisciata stabilizzata.

In [3] è stata misurata una decelerazione nei primi istanti dello scarrocciamento (la fase di impatto) di circa  $0,8 \div 1,5$  g. Nella fase di strisciata stabilizzata la decelerazione diminuisce, raggiungendo valori di circa 0,35 g.

In [4] viene osservato che la decelerazione media è maggiore durante la fase di contatto iniziale a causa dell'effetto di incisione della pavimentazione che si verifica da parte di parti sporgenti del veicolo. Nell'impatto a terra si genera inoltre una forza di contatto maggiore rispetto al peso proprio del veicolo, per cui si ha una decelerazione maggiore. La fase di decelerazione iniziale più elevata ha una durata mediamente di circa 0,5 secondi, per cui risulta significativa per tracce corte e trascurabile per tracce medio lunghe.

Nei casi di velocità iniziale inferiore ai 10 km/h. spesso è impossibile risalire alla decelerazione e al coefficiente di attrito equivalente in quanto il veicolo non lascia una traccia definita e misurabile sulla pavimentazione, ma si arresta praticamente nella posizione in cui urta a terra: l'unica fonte di dissipazione dell'energia è riconducibile alla collisione con l'asfalto, e non allo strisciamento. In

letteratura [3] in tali eventi viene suggerito di adottare, qualora sia identificabile una traccia di scarrocciamento misurabile, un coefficiente di attrito compreso tra 0,75 e 1. Qualora al contrario non venga rilevata alcuna traccia sulla pavimentazione è possibile affermare, stante i risultati della sperimentazione condotta, che la velocità di marcia del veicolo fosse stata sicuramente inferiore ai 10 km/h.

La terza fase del fenomeno, la strisciata stabilizzata, è compresa tra il momento in cui inizia la stabilizzazione dello scivolamento, senza più urti e rimbalzi significativi e l'arresto del motoveicolo. In questa fase si possono generare delle rotazioni del mezzo che influenzano la lunghezza della traccia. L'analisi dei filmati delle prove sperimentali in cui si sono sviluppate delle rotazioni, evidenziano che esse non avvengono in punti precisi del tragitto in strisciata. In alcuni dei test effettuati, la rotazione avviene immediatamente dopo l'impatto, mentre in altri poco prima che il mezzo si arresti. Nel primo caso è quasi sempre la configurazione iniziale del motociclo che genera il fenomeno della rotazione, infatti se al momento dell'impatto a terra esso non è orientato nella originale direzione di marcia, o se esso semplicemente impatta con il manubrio sterzato possono generarsi moti di rotazione. Nei casi in cui invece questi si generino nella fase finale dello scivolamento, le cause sono da ricercare nel profilo della superficie stradale, oppure nelle caratteristiche del motoveicolo. I contatti tra fianco del veicolo e asfalto, durante la fase di strisciamento, a causa di trasferimenti di carico inerziali possono variare nel tempo generando rotazioni che a loro volta innescano nuovi trasferimenti di carico inerziali. Il risultato è che il veicolo può anche manifestare rotazioni in più sensi durante la stessa fase di strisciata.

In ogni caso, la sperimentazione ed i dati di letteratura indicano che esse non sono così frequenti, e generalmente sono di entità modesta, ossia l'angolo che si viene a formare tra la posizione corretta di marcia e quella finale supera raramente i 90°.

Negli articoli citati [3-5] le velocità di prova sono comprese nel range 10-95 km/h ed il coefficiente di decelerazione medio misurato varia tra 0,25 e 0,79.

In [7] la fase di strisciata a terra dei mezzi a due ruote viene analizzata prendendo in considerazione veicoli a due ruote tipo scooter, veicoli molto utilizzati in ambito urbano che non sono stati testati in letteratura e vengono confrontati con i veicoli tipo motocicli o ciclomotori. Gli scooter hanno generalmente la caratteristica di essere completamente rivestiti con carenature in plastica, hanno una altezza e baricentro basso e ruote di taglia più piccola rispetto ai motocicli. La sperimentazione sugli scooter è stata svolta in un range di velocità tipiche dell'ambiente urbano ovvero a velocità di marcia fino ai 50 km/h. Nello studio viene ignorata l'interazione tra motociclista e veicolo, tipica della prima fase di perdita di controllo del veicolo. Inoltre nello studio viene trascurata l'influenza dell'usura del mezzo, dovuta alla ripetizione di più prove su uno stesso veicolo, sul

coefficiente di decelerazione. La modalità di svolgimento delle prove è stata orientata a raggiungere il massimo grado di realismo nel riprodurre i fenomeni di urto e rimbalzo a terra che si verificano durante un incidente. La condotta dei mezzi in velocità è stata eseguita con l'ausilio di un autocarro dotato di gru (figura 1.3) alla quale è stato collegato un sistema di aggancio per il manubrio dotato di un moschettone di sgancio rapido. Il trascinamento avviene sollevando di pochi centimetri la ruota anteriore così da consentire il solo rotolamento della ruota posteriore. Al raggiungimento della velocità desiderata, il veicolo viene sganciato agendo su un cavo che apre il moschettone di collegamento e il veicolo, non essendo più sostenuto, perde l'equilibrio e cade producendo lo scarrocciamento a terra sul fianco. Le prove sono state svolte su tre diverse tipi di pavimentazione (Asfalto nuovo, asfalto usurato, cemento) e a diversi valori di velocità, compresi nel range 10-50 km/h.



Figura 1.3 - Tecnica utilizzata in [7] per il trascinamento e successivo lancio dei veicoli a due ruote.

In [7] sono state identificate le fasi principali del moto del veicolo a terra (impatto a terra e rimbalzi, strisciata stabilizzata) ed è stata studiata l'influenza di alcuni fattori sul fenomeno: tipo di asfalto, presenza della carenatura, velocità di caduta e massa del veicolo. L'analisi dei dati sperimentali ha fornito un coefficiente di decelerazione medio maggiore per la categoria di veicoli non carenati. In particolare è stato valutato un coefficiente medio, mediato su tutti i tipi di pavimentazione testati, pari a 0,44 per i veicoli carenati e 0,52 per i veicoli non carenati. La differenza può essere ricercata proprio nelle caratteristiche delle due categorie di veicoli testati: nei veicoli non carenati la presenza di maggiori parti sporgenti facilita l'aggancio con la pavimentazione incrementando il coefficiente decelerazione. Per entrambe le tipologie di veicoli testati in [7] (mezzi carenati e mezzi non carenati) il coefficiente di decelerazione risulta maggiore nella

pavimentazione bituminosa con asfalto nuovo rispetto a quella con asfalto usurato. La decelerazione sulla pavimentazione in cemento per entrambe le categorie di veicoli testati risultata maggiore rispetto a quella sulle pavimentazioni bituminose. Infine in [7] non è stata riscontrata alcuna correlazione significativa né tra la massa del veicolo ed il coefficiente di decelerazione, né tra la velocità di marcia del mezzo ed il coefficiente di decelerazione, nel range di velocità 10-50 km/h.

Gli articoli tecnici di letteratura sulla ricostruzione degli incidenti motociclistici considerano, oltre alle prove di scarrocciamento descritte finora, principalmente un altro test utile per la comprensione e lo studio del fenomeno in discussione. Si tratta delle prove di trascinamento (o drag), con le quali è possibile ricavare il coefficiente di attrito tra il fianco del motoveicolo e l'asfalto.

Day e Smith [8] hanno utilizzato dei test di trascinamento per risalire alla velocità iniziale di un motociclo che striscia fino all'arresto, utilizzando il coefficiente di attrito ricavato proprio da questo tipo di prove.

In [7] le prove di trascinamento sono state mirate alla verifica della applicabilità di un metodo semplificato e speditivo per valutare in loco, anche durante il rilievo dell'incidente stradale da parte delle autorità preposte, il coefficiente di decelerazione tra motoveicolo e pavimentazione. In queste prove il veicolo testato è stato posizionato su un fianco con la ruota anteriore orientata in direzione di marcia, e trainato da un carro gru attraverso un cavo agganciato alla forcella del motoveicolo. In serie al cavo di traino è stata inserita una cella di carico, con risoluzione di 10N. Il traino del veicolo è stato effettuato partendo da velocità iniziale nulla fino al raggiungimento della velocità  $v=20\text{km/h}$ , che il mezzo trainante mantiene costante per qualche secondo, al fine di acquisire un valore di forza circa costante e non influenzato dagli effetti inerziali. I risultati ottenuti in [7] mostrano che nel caso dei veicoli carenati il coefficiente di decelerazione, calcolato con le prove di trascinamento, risulta simile a quello ottenuto con le prove di scarrocciamento (0,43 e 0,42), mentre nel caso dei veicoli non carenati le differenze sono più evidenti (0,43 e 0,54).

### 1.1.1 Moto del conducente

Per quanto riguarda l'analisi del moto del conducente si hanno molti parametri che influenzano il moto dopo l'urto. Durante la fase di strisciamento sull'asfalto o su un terreno disomogeneo, le tracce lasciate sull'asfalto non sono sempre visibili e valutabili; risulta ancora più difficile valutare il coefficiente d'attrito perché non è noto se il moto risulta di strisciamento puro o accompagnato da rotolamento. Inoltre negli incidenti tra un veicolo e un motociclo, nel momento in cui il pilota si separa dalla moto è possibile studiare la traiettoria del corpo in aria. Tuttavia, nella maggior parte delle situazioni è nota la distanza del punto

d'impatto alla posizione di riposo e non la distanza dall'impatto al punto di primo contatto con il suolo, per questo motivo la teoria del moto del proiettile non è sufficiente. La distanza percorsa dal corpo, dopo il primo contatto con il suolo, può essere divisa in due fasi: nella prima fase si hanno dei rimbalzi del corpo e nella seconda strisciamento accompagnato da possibile rotolamento. Il corpo viene lanciato con un angolo di proiezione ed è caratterizzata da un coefficiente di rimbalzo e un coefficiente di attrito. È stato proposto da Searle [9] un modello che definisce la velocità post urto del conducente. Considerando i parametri descritti, si ha:

$$v_0 = \frac{\sqrt{2\mu g d}}{\cos \vartheta + \mu \sin \vartheta} \quad (1.1)$$

dove:

- $\vartheta$  è l'angolo di decollo del pilota;
- $d$  è la distanza tra il punto di lancio e la posizione di riposo (m);
- $g$  è l'accelerazione di gravità espressa in  $\text{m/s}^2$ ;
- $\mu$  è il coefficiente di attrito tra corpo e superficie e dipende il tipico movimento del corpo nelle fasi dopo l'impatto.

Il coefficiente di attrito  $\mu$ , secondo il tipico movimento del corpo nelle fasi successive allo schianto, può essere assunto indicativamente pari a 0,8 per moto su erba e 0,6-0,7 per moto su asfalto.

Nella maggior parte dei casi l'angolo di decollo non è noto, di conseguenza, è possibile assumere un valore di angolo compreso in un certo intervallo che dipende dalla geometria del mezzo; eseguendo opportuni crash test su motocicli è stata ricavata da Frank [10] la variabilità di questo angolo come visibile in figura 1.4.

Inoltre la velocità di decollo del pilota dopo l'urto generalmente risulta inferiore dalla velocità della moto al momento dell'urto ma la variazione percentuale non risulta costante come visibile in figura 1.5.

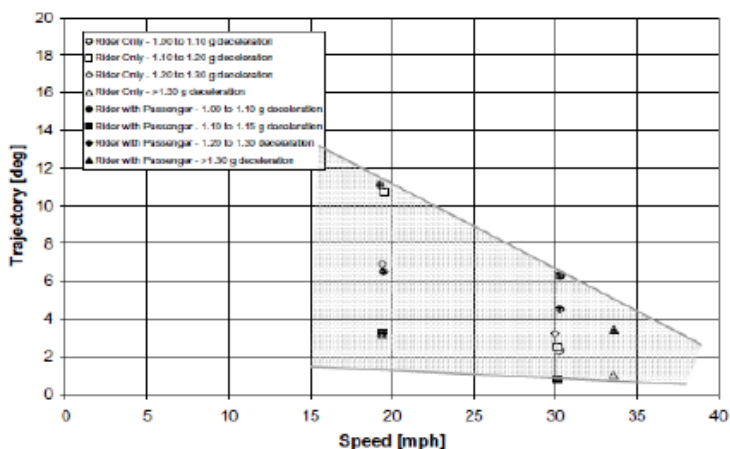


Figura 1.4 – Range dell'angolo di decollo del pilota.

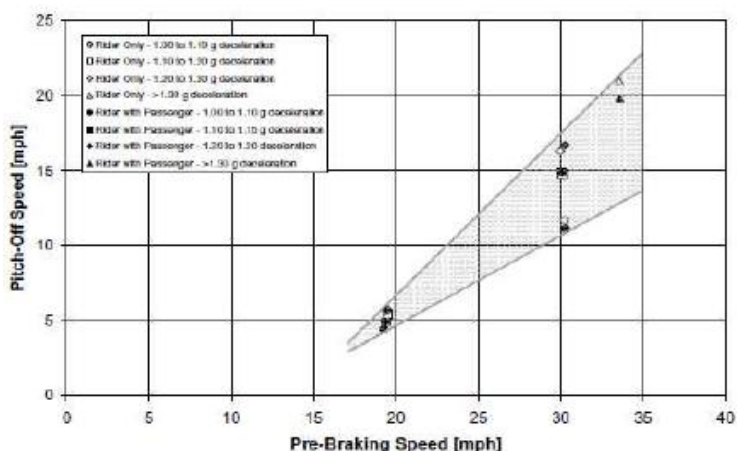


Figura 1.5 – Velocità di impatto in funzione della velocità di decollo.

La variabilità della velocità è dovuta alle geometrie dei corpi coinvolti e dal comportamento del pilota negli istanti che precedono l'urto. L'analisi del moto post-impatto del conducente risulta influenzata da assunzioni dei vari coefficienti che, tra l'altro non risultano costanti in tutta l'analisi, e da molteplici parametri definiti in intervalli determinati sperimentalmente.

## 2 Fase di urto

### 2.1 Analisi della fase d'urto

La fase d'urto anche se risulta di breve durata, influenza maggiormente l'incidente perché si hanno forze (di carattere impulsivo) di notevole intensità che provocano deformazioni e cedimenti strutturali nei corpi coinvolti. Inoltre è possibile trattare anche la dinamica degli occupanti dei mezzi coinvolti e correlarla alle lesioni subite dagli stessi.

Trattandosi di forze impulsive viene immediato analizzare la fase con i modelli impulsivi della fisica di base. Considerando urti a basse velocità le forze esterne non saranno più trascurabili perché risultano della stessa intensità delle forze impulsive; in questi casi bisogna prendere in considerazione sia le forze impulsive tra i corpi, sia le interazioni con l'ambiente. Un altro metodo, generalmente più usato perché più stabile rispetto al precedente, consiste nello stimare l'energia di deformazione dei veicoli coinvolti nell'urto attraverso le deformazioni subite da questi ed utilizzando i principi dell'impulso si ricostruisce la fase. L'energia di deformazione sarà funzione dei veicoli che collidono in particolare dalle masse, dalle forze scambiate, dalle caratteristiche strutturali e dalle velocità relative. La stima dell'energia di deformazione è ottenuta tramite modelli teorici ed empirici implementati su dati provenienti da crash test. Il comportamento di ogni urto, e quindi della relativa energia di deformazione, è funzione di molti parametri e rappresenta un caso a sé stante. Di conseguenza nel calcolo dell'energia saranno quindi utilizzati dei parametri medi per semplificare la stima.

### 2.2 Modelli impulsivi

Gli urti tra due veicoli possono essere classificati in vari modi; per quanto riguarda la fisica dell'urto si può effettuare una distinzione in base alla conservazione dell'energia cinetica: si definiscono urti elastici quando l'energia cinetica si conserva e di urti anelastici, o plastici, quando questa non si conserva.

Per quanto riguarda invece la descrizione del comportamento dei veicoli durante la collisione, si possono distinguere gli urti in centrati ed eccentrici; si parla di urti centrati quando l'impulso delle forze scambiate tra i veicoli passa per i rispettivi baricentri, mentre si parla di urti eccentrici quando l'impulso delle forze non passa per entrambi i baricentri.

L'analisi della fase di urto, seguendo l'approccio classico di ricostruzione degli incidenti stradali, consiste in primo luogo nel valutare le velocità e le direzioni dei veicoli all'inizio di tale fase, note le velocità e le direzioni alla fine dell'urto (calcolate nell'analisi della fase post urto) e successivamente nello stimare le accelerazioni subite dal singolo veicolo e dagli occupanti analizzando attentamente anche tutte le altre informazioni che possono scaturire in merito al comportamento del veicolo e dell'interazione tra guidatore veicolo e strada.

Storicamente lo studio degli urti tra due corpi si è basato sulle leggi del moto di Newton, fondate sulla conservazione dell'energia ed espresse attraverso gli integrali primi di moto; i modelli derivati da questo approccio sono detti modelli impulsivi.

Si possono effettuare schematizzazioni dei veicoli più o meno dettagliate considerando solo alcune delle componenti del moto o solo alcune forze in gioco; in molti casi pratici si possono ottenere informazioni sufficienti analizzando la collisione dei veicoli schematizzandoli come punti materiali e trascurando le forze esterne al sistema, in altri casi risulta invece necessario considerare le dimensioni finite dei veicoli, ad esempio per valutare anche le velocità angolari.

Nei modelli impulsivi l'urto viene considerato di una durata infinitesima e non si tiene conto delle modalità con cui i veicoli si scambiano le forze durante il loro contatto. L'uso degli integrali primi di moto, come la quantità di moto e dell'impulso delle forze consente di ottenere equazioni che legano le grandezze relative al veicolo all'inizio e alla fine del contatto, di tipo algebrico anziché equazioni differenziali; ma a fronte di questa semplificazione si perdono le informazioni sulle traiettorie, non tenendo in considerazione il tempo e la posizione, ma solo le condizioni (tipicamente di velocità) iniziali e finali.

Per meglio comprendere i meccanismi dell'urto e della deformazione dei veicoli viene analizzata anche la risposta strutturale dei veicoli sia contro una barriera rigida, sia contro un altro veicolo, abbandonando il modello impulsivo ed esaminando le relazioni esistenti tra le forze che si scambiano i veicoli, le deformazioni e il tempo, al fine di ottenere modelli che abbiano come punto di partenza proprio queste informazioni. Alcuni approcci utilizzati nella ricostruzione degli incidenti stradali sono basati su correlazioni tra le misure delle deformazioni permanenti sui veicoli ed energia dissipata, attraverso relazioni, le quali si avvalgono anche di risultati sperimentali, che descrivono la risposta elasto-plastica delle strutture.



### 2.2.1 Modello ad un grado di libertà

Per descrivere la dinamica dell'urto in tutti quei casi in cui le grandezze vettoriali coinvolte abbiano tutte la stessa direzione può essere utilizzato un modello ad un grado di libertà.

Durante l'urto, tra i veicoli si generano delle forze di reazione che, istante per istante, sono uguali in modulo e direzione, ma con verso opposto come in accordo con la terza legge di Newton; il sistema dei due veicoli rimane quindi in equilibrio sotto l'azione di queste forze interne di contatto.

In realtà sul sistema agiscono anche forze esterne, generate dall'interazione tra ruote e terreno o da aspetti aerodinamici e gravitazionali, queste sono però generalmente di entità modesta rispetto a quelle in gioco tra i veicoli e di conseguenza possono essere trascurate senza commettere errori sensibili; questa ipotesi perde di validità nel caso si considerino urti a basse velocità, in cui l'intensità delle forze esterne e interne può essere paragonabile.

Si riporta in figura 2.1 lo schema di un urto centrato tra due veicoli; viene scelto un sistema di riferimento inerziale, solidale con il terreno, in cui la posizione dei veicoli viene indicata con la variabile  $x$ , mentre si indica con  $F$  la forza di contatto agente su ognuno dei veicoli.

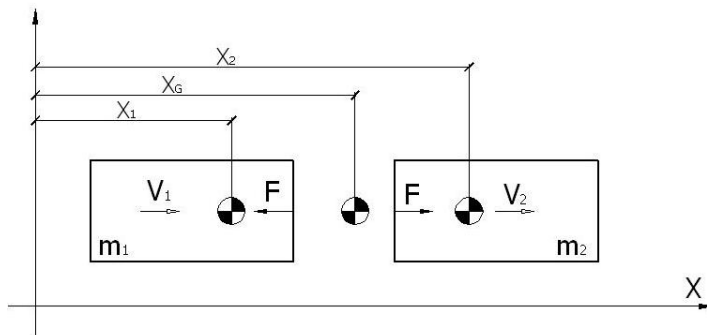


Figura 2.1 - Schematizzazione ad un grado di libertà dell'urto tra due veicoli.

Ricordando la seconda legge di Newton si può scrivere che la forza agente su ogni veicolo è pari alla massa del veicolo stesso moltiplicata per la sua accelerazione; indicando con il pedice 1 le grandezze riferite al veicolo 1 e con il pedice 2 quelle riferite al veicolo 2 si può scrivere:

$$\begin{aligned} -F &= m_1 \ddot{x}_1 \\ F &= m_2 \ddot{x}_2 \end{aligned} \tag{2.1}$$

Eliminando  $F$  si ottiene:

$$m_1 \ddot{x}_1 + m_2 \ddot{x}_2 = 0 \quad (2.2)$$

Questa equazione rappresenta l'equilibrio dinamico dei veicoli; integrandola sull'intera durata dell'urto  $\Delta t$  e considerando la massa dei veicoli indipendente dal tempo si ottiene:

$$m_1 \int_{\Delta t} \ddot{x}_1 dt + m_2 \int_{\Delta t} \ddot{x}_2 dt = 0 \quad (2.3)$$

esplicitando gli integrali:

$$m_1 \Delta V_1 = -m_2 \Delta V_2 \quad (2.4)$$

dove:

$$\begin{aligned} \Delta V_1 &= V_{f1} - V_{i1} \\ \Delta V_2 &= V_{f2} - V_{i2} \end{aligned} \quad (2.5)$$

Nelle equazioni precedenti si sono indicate con  $V_i$  le velocità all'inizio dell'urto e con  $V_f$  quelle alla fine.

La (2.3) indica anche che gli impulsi  $I$  delle forze interne che agiscono sui veicoli sono uguali e di verso opposto, se la si va a considerare insieme alla (2.6) si ottiene il *teorema dell'impulso*, il quale afferma che la variazione della quantità di moto di un veicolo è uguale all'impulso ricevuto:

$$I = m_1 \Delta V_1 = -m_2 \Delta V_2 \quad (2.6)$$

Tramite banali passaggi matematici si può ottenere dall'equazione (2.4) la seguente espressione:

$$\frac{\Delta V_1}{\Delta V_2} = -\frac{m_2}{m_1} \quad (2.7)$$

La quale sta ad indicare che le variazioni di velocità a cui sono sottoposti i veicoli durante l'urto è inversamente proporzionale alle rispettive masse; è da

notare che questa affermazione è valida per qualunque tipo di urto, anche non centrato.

Il parametro  $\Delta v$  è un parametro importante nella valutazione della violenza dell'urto e di conseguenza delle lesioni potenzialmente subite dai passeggeri, questi subiscono infatti lo stesso  $\Delta v$  subito dal veicolo, anche se le decelerazioni subite dal mezzo sono legate anche alla rigidità di quest'ultimo; nel valutare il  $\Delta v$  non è stata però fatta nessuna affermazione sulla rigidità del veicolo in quanto questa non influisce su questo parametro, come vedremo più avanti, soltanto sull'entità delle deformazioni subite.

Esplicitando e cambiando l'ordine dei termini nella (2.4) si ottiene:

$$m_1 V_{i1} + m_2 V_{i2} = m_1 V_{f1} + m_2 V_{f2} \quad (2.8)$$

Che esprime la conservazione della quantità di moto nell'urto.

Dato che la (2.2) può essere integrata su un qualsiasi intervallo di tempo si può ottenere un'espressione simile alla (2.4) valida per ogni istante dell'urto; si evince quindi che la quantità di moto rimane costante in ogni istante  $t$ :

$$mV_1 + mV_2 = \text{cost} \quad \forall t \quad (2.9)$$

Considerando i due veicoli come un unico sistema di corpi distribuiti nello spazio monodimensionalmente individuato dall'asse  $X$  del sistema di riferimento scelto (vedi figura 1.6). Date le posizioni dei due veicoli, la posizione del baricentro del sistema è espressa, in ogni istante, come:

$$x_G = \frac{m_1 x_1 + m_2 x_2}{m_1 + m_2} \quad (2.10)$$

Derivando rispetto al tempo questa espressione si ottiene la velocità  $V_G$  del baricentro:

$$V_G = \frac{m_1 V_{i1} + m_2 V_{i2}}{m_1 + m_2} \quad (2.11)$$

Ricordando la (2.8) si può esprimere la velocità del baricentro anche in funzione delle velocità finali:

$$V_G = \frac{m_1 V_{f1} + m_2 V_{f2}}{m_1 + m_2} \quad (2.12)$$

Sfruttando la (2.9) si può adesso esprimere la conservazione della quantità di moto globale del sistema:

$$(m_1 + m_2)V_G = \cos t \quad (2.13)$$

Il sistema considerato, a meno delle forze esterne, risulta infatti isolato ed in equilibrio, si può quindi affermare che in questa situazione la velocità del baricentro non viene alterata durante l'urto e che questo mantiene il suo stato di quiete o di moto rettilineo uniforme.

Questa particolare proprietà del baricentro ci suggerisce di poter scegliere come sistema di riferimento, per l'espressione delle velocità dei veicoli, quello ad esso solidale, che sarà chiamato riferimento del centro di massa; le grandezze espresse in questo sistema di riferimento saranno da adesso indicate con il pedice *cm*.

Dato che il baricentro si trova in quiete oppure si muove di moto uniforme, anche il sistema di riferimento ad esso riferito sarà inerziale; qualora la velocità  $V_{Gcm}$  del baricentro risultasse nulla, dalla (2.13) si deduce che anche la quantità di moto del sistema nel nuovo sistema di riferimento sarà nulla.

Le velocità iniziali dei veicoli, rispetto alla velocità del baricentro, risulteranno:

$$\begin{aligned} V_{i1cm} &= V_{i1} - V_G \\ V_{i2cm} &= V_{i2} - V_G \end{aligned} \quad (2.14)$$

Mentre le velocità finali:

$$\begin{aligned} V_{f1cm} &= V_{f1} - V_G \\ V_{f2cm} &= V_{f2} - V_G \end{aligned} \quad (2.15)$$

La velocità relativa dei veicoli all'inizio dell'urto è data dalla differenza delle loro velocità iniziali e risulta positiva se i veicoli si avvicinano e negativa se i veicoli si allontanano; ovviamente la velocità relativa deve essere la stessa per ogni riferimento inerziale.

$$V_{iR} = V_{i1} - V_{i2} = V_{i1cm} - V_{i2cm} \quad (2.16)$$

La stessa considerazione vale anche per le velocità finali:

$$V_{fR} = V_{f1} - V_{f2} = V_{f1cm} - V_{f2cm} \quad (2.17)$$

Sostituendo la (2.12) nella (2.14) si ottengono le espressioni delle velocità dei veicoli rispetto alla velocità del baricentro del sistema:

$$\begin{aligned} V_{i1cm} &= \frac{m_2}{m_1 + m_2} V_{iR} \\ V_{i2cm} &= -\frac{m_1}{m_1 + m_2} V_{iR} \end{aligned} \quad (2.18)$$

Queste espressioni sono valide per qualsiasi istante  $t$ , sostituendo i valori di velocità relativa iniziali con quelli al tempo  $t$ .

Dalle (2.5) e dalla (2.17) si ottiene poi che la differenza tra le velocità relative finali e iniziali è pari alla differenza tra le variazioni di velocità subite dai singoli veicoli durante l'urto:

$$V_{fR} - V_{iR} = \Delta V_1 - \Delta V_2 \quad (2.19)$$

Eliminando  $\Delta V_2$  tra la (2.3) e la (2.18) si ottiene:

$$V_1 = -\frac{m_2}{m_1 + m_2} \left( 1 - \frac{V_{fR}}{V_{iR}} \right) V_R \quad (2.20)$$

Eliminando invece  $\Delta V_1$  si ottiene:

$$V_2 = \frac{m_1}{m_1 + m_2} \left( 1 - \frac{V_{fR}}{V_{iR}} \right) V_R \quad (2.21)$$

### 2.2.1.1 Il coefficiente di restituzione

Consideriamo un urto frontale come quello schematizzato in figura 2.1, in cui il primo veicolo si muove verso destra, con velocità positiva e il secondo veicolo si muove verso sinistra, con velocità negativa; i segni delle velocità sono dettati dal sistema di riferimento assunto. L'urto in questione è caratterizzato da una prima fase, detta di compressione, in cui i baricentri dei veicoli si avvicinano, con velocità relativa positiva, fino a raggiungere una distanza minima, ovvero di massima deformazione, chiamata anche deformazione dinamica.

In questo punto, indicato come istante  $t_c$ , le velocità dei veicoli sono uguali, ovvero la velocità relativa è nulla, dopo di che si ha la cosiddetta fase di restituzione, in cui la velocità relativa si inverte di segno e i veicoli si allontanano, recuperando parte delle deformazioni subite (componente elastica).

La velocità dei veicoli nell'istante  $t_c$ , essendo nulla la velocità relativa  $V_R$ , per la (2.18) coincide con la velocità  $V_G$  del baricentro del sistema; al momento in cui cessa il contatto tra i veicoli, si ha una deformazione permanente su entrambi, detta deformazione residua.

In entrambe le fasi, di compressione e di restituzione, le forze di contatto che si scambiano i veicoli mantengono lo stesso verso tendendo a far allontanare i veicoli e a fare invertire il segno della velocità relativa.

Integrando le forze negli intervalli  $t_1-t_c$  e  $t_c-t_2$  si ottengono gli impulsi di compressione e di restituzione, rispettivamente:

$$\begin{aligned} I_c &= \int_{t_1}^{t_c} F dt \\ I_r &= \int_{t_c}^{t_2} F dt \end{aligned} \quad (2.22)$$

Newton per primo postulò, in base all'evidenza sperimentale, che l'impulso di restituzione fosse proporzionale all'impulso di compressione e chiamò il loro rapporto *coefficiente di restituzione* ( $\varepsilon$ ):

$$\varepsilon = \frac{I_r}{I_c} \quad (2.23)$$

Dalla (2.1) e dalle (2.22), integrando si, ottiene:

$$\begin{aligned} I_c &= m_1(V_{i1} - V_G) = m_2(V_G - V_{i2}) \\ I_r &= m_1(V_G - V_{f1}) = m_2(V_{f2} - V_G) \end{aligned} \quad (2.24)$$

Nel caso di urto totalmente elastico, in cui cioè non si abbiano deformazioni permanenti, si ha  $\varepsilon = 1$  e la variazione di velocità nella fase di compressione, è uguale e contraria a quella nella fase di restituzione per entrambi i veicoli. Viceversa se l'urto è totalmente plastico, ovvero la deformazione dinamica coincide con quella residua, senza alcun ritorno elastico,  $\varepsilon = 0$  ed i due veicoli a fine urto posseggono la stessa velocità comune  $V_G$ .

Sostituendo nella (2.23) le (2.22) si ottiene:

$$\varepsilon = \frac{I_r}{I_c} = \frac{m_1(V_G - V_{f1})}{m_1(V_{i1} - V_G)} \quad (2.25)$$

Da cui sostituendo al numeratore l'espressione della velocità del baricentro data dalla (2.12) e al denominatore quella data dalla (2.11), si ottiene:

$$\varepsilon = \frac{\frac{(m_1 V_{f1} + m_2 V_{f2})}{m_1 + m_2} - V_{f1}}{V_{i1} - \frac{(m_1 V_{i1} + m_2 V_{i2})}{m_1 + m_2}} \quad (2.26)$$

Da cui semplificando si ottiene la forma più utilizzata del coefficiente di restituzione:

$$\varepsilon = -\frac{V_{fR}}{V_{iR}} = \frac{V_{f2} - V_{f1}}{V_{i1} - V_{i2}} \quad (2.27)$$

Il coefficiente di restituzione, essendo definito come il rapporto tra l'impulso nella fase di restituzione e l'impulso nella fase di compressione, esprime il comportamento strutturale dei due veicoli.

A causa della complessità geometrica delle strutture in contatto, risulta molto difficile poter calcolare un coefficiente di restituzione, dati i due veicoli e le condizioni di urto; il coefficiente di restituzione è perciò un dato che viene determinato sperimentalmente, sulla base di crash test.

Tipicamente esso assume valori prossimi a zero per urti ad alta velocità, caratterizzati da grandi deformazioni mentre assume valori maggiori al diminuire della velocità relativa di avvicinamento; il valore unitario non viene praticamente mai raggiunto a causa del comportamento dei materiali e alla presenza di altre forze dissipative.

### 2.2.1.2 Calcolo delle velocità nel caso generale

Considerando la definizione di coefficiente di restituzione e le (2.20) e (2.21), le variazioni di velocità subite dai veicoli a seguito dell'urto possono essere scritte come:

$$\begin{aligned}\Delta V_1 &= -\frac{m_2}{m_1 + m_2}(1 + \varepsilon)V_{iR} \\ \Delta V_2 &= \frac{m_2}{m_1 + m_2}(1 + \varepsilon)V_{iR}\end{aligned}\quad (2.28)$$

Queste equazioni legano le variazioni di velocità dei rispettivi veicoli alla velocità relativa iniziale.

Definiamo  $m_c$  come massa equivalente del sistema costituito dai due veicoli:

$$m_c = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \quad (2.29)$$

Possiamo scrivere le velocità dei veicoli dopo l'urto in funzione di quelle prima dell'urto:

$$\begin{aligned}V_{1f} &= V_{1i} - \frac{m_c}{m_1}(1 + \varepsilon)V_{iR} \\ V_{2f} &= V_{2i} + \frac{m_c}{m_2}(1 + \varepsilon)V_{iR}\end{aligned}\quad (2.30)$$

Si nota che, volendo determinare la velocità post urto, anche di un solo veicolo, è necessario conoscere le velocità prima dell'urto di entrambi i veicoli, o meglio la loro velocità relativa; infatti come si è detto a riguardo del coefficiente di restituzione, tutti e due i veicoli contribuiscono a determinare la dinamica dell'urto e le sue conseguenze.

In generale non sono note le velocità iniziali dei veicoli ma possono essere valutate invece le velocità finali di uscita dall'urto, attraverso l'analisi dei moti post urto; in questo caso le (2.28) possono essere usate in un ciclo iterativo di approssimazioni successive, assumendo dei valori di tentativo per le velocità iniziali incognite e verificando se le uguaglianze sono soddisfatte.

Nel caso in cui il coefficiente di restituzione sia nullo, le (2.30) non sono invertibili e anche con la soluzione iterativa diretta si ottengono infinite soluzioni; quando siamo di fronte ad un urto perfettamente plastico quindi, l'approccio basato unicamente sulla quantità di moto non risulta idoneo alla determinazione delle condizioni iniziali a partire da quelle finali.

In questi casi si deve considerare anche il bilancio dell'energia e la valutazione dell'energia di deformazione dei veicoli come sarà descritto più avanti.



### 2.2.1.3 Calcolo della velocità in casi particolari

Consideriamo alcuni casi particolari di urto centrato. Nel caso totalmente plastico ( $\varepsilon = 0$ ) si ha:

$$V_{f1} = V_{f2} = \frac{m_1 V_{i1} + m_2 V_{i2}}{m_1 + m_2} \quad (2.31)$$

Viceversa per urti completamente elastici ( $\varepsilon = 1$ ):

$$\begin{aligned} V_{f1} &= \frac{(m_2 - m_1)V_{i1} + 2m_2 V_{i2}}{m_1 + m_2} \\ V_{f2} &= \frac{(m_2 - m_1)V_{i2} + 2m_1 V_{i1}}{m_1 + m_2} \end{aligned} \quad (2.32)$$

In un urto di un veicolo contro un oggetto fisso, come ad esempio un muro o un palo, si può porre  $m_2 = \infty$  e  $V_2 = 0$ , quindi:

$$\frac{m_2}{m_1 + m_2} = \frac{1}{\frac{m_1}{m_2} + 1} = 1 \quad (2.33)$$

Da cui:

$$V_{f1} = -\varepsilon V_{i1} \quad (2.34)$$

Quindi nel caso di urto perfettamente plastico, il veicolo assume dopo l'urto la stessa velocità che aveva prima ma con direzione opposta.

### 2.2.1.4 Energia

In ogni urto una quota dell'energia cinetica posseduta inizialmente dai veicoli viene convertita in altre forme di energia, in parte viene trasferita da un veicolo all'altro e in parte rimane come energia cinetica residua di ciascun veicolo.

L'energia cinetica del sistema può essere espressa, durante qualsiasi fase dell'urto, come la somma dell'energia cinetica posseduta dal baricentro  $E_g$ , più l'energia cinetica dei veicoli, calcolata nel sistema di riferimento del centro di massa. Ricordando le espressioni delle velocità dei veicoli rispetto al baricentro si può esprimere l'energia cinetica come:

$$E_c = \frac{1}{2}(m_1 + m_2)V_G^2 + \frac{1}{2} \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} V_R^2 \quad (2.35)$$

Dove possiamo definire come massa equivalente del sistema  $m_c$  il termine:

$$m_c = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \quad (2.36)$$

L'energia cinetica è quindi funzione della velocità del baricentro e della velocità relativa tra due veicoli; poiché, come si è detto in precedenza, la velocità del baricentro è costante in ogni momento, il termine dell'energia cinetica ad essa riferito sarà anch'esso costante nel tempo. Quindi la variazione di energia cinetica del sistema è dovuta esclusivamente alle variazioni di velocità relativa tra i veicoli.

Al fine di analizzare le modalità di trasferimento dell'energia da un veicolo all'altro, tramite un bilancio di energia, risulta comodo suddividere l'urto in due fasi: la fase di compressione e la fase di restituzione.

### Fase di compressione

In questa fase i veicoli vengono a contatto tra di loro con una velocità relativa  $V_R$  e una parte dell'energia cinetica iniziale del sistema viene assorbita nella deformazione dei veicoli; questa energia assorbita  $E_a$  ha due componenti, una elastica e una anelastica. La componente elastica  $E_r$  viene recuperata dal sistema nella fase di restituzione, mentre quella anelastica viene principalmente immagazzinata dal veicolo andando a costituire le sue deformazioni permanenti.

La componente anelastica viene considerata ai fini del bilancio come energia dissipata  $E_d$ , in quanto non recuperabile sotto forma di energia cinetica del sistema; si ha quindi:

$$E_a = E_r + E_d \quad (2.37)$$

Il bilancio energetico del sistema, costituito dai due veicoli, per la fase di compressione sarà quindi espresso come:

$$E_{ci} = E_G + E_a \quad (2.38)$$

Dove con il termine  $E_{ci}$  si è indicata l'energia cinetica iniziale dei veicoli, dalla (2.35) si ha quindi:

$$E_a = \frac{1}{2} m_c V_R^2 \quad (2.39)$$

### Fase di restituzione

In questa fase parte dell'energia assorbita dalle strutture sotto forma di energia potenziale elastica, viene liberata trasformandosi in energia cinetica, in quantità proporzionale alle loro caratteristiche fisiche. La velocità relativa dei due veicoli all'inizio di questa fase è nulla fino ad assumere il valore  $V_{fR}$  a fine urto.

L'energia cinetica del sistema alla fine dell'urto sarà quindi:

$$E_{cf} = \frac{1}{2} (m_1 + m_2) V_G^2 + \frac{1}{2} m_c V_{fR}^2 \quad (2.40)$$

Il bilancio energetico del sistema risulta quindi:

$$E_{cf} = E_G + E_r \quad (2.41)$$

La quota di energia restituita elasticamente sarà quindi espressa come:

$$E_r = \frac{1}{2} m_c V_{fR}^2 \quad (2.42)$$

Ricordando l'espressione del coefficiente di restituzione:

$$E_r = \frac{1}{2} m_c V_{fR}^2 \epsilon^2 \quad (2.43)$$

Si può quindi esplicitare il termine di energia dovuto all'energia dissipata, pari a:

$$E_d = \frac{1}{2} m_c (1 - \epsilon^2) V_{fR}^2 \quad (2.44)$$

Questa espressione lega l'energia dissipata, che può essere valutata attraverso metodi sperimentali basati sulla misura delle deformazioni, alla velocità relativa iniziale dei due veicoli, parametro solitamente ricercato nella ricostruzione di un incidente stradale. Si può quindi esprimere questa velocità relativa come:

$$V_{iR} = \sqrt{\frac{2E_d}{m_c(1-\varepsilon^2)}} \quad (2.45)$$

Grazie a questa espressione, si può risalire alla velocità relativa tra i due veicoli coinvolti nel sinistro a partire soltanto dall'energia di deformazione di entrambi i mezzi.

Le rispettive variazioni di velocità subite dai singoli mezzi risultano quindi:

$$\begin{aligned} \Delta V_1 &= \frac{1}{m_1} \sqrt{2E_d m_c \frac{(1+\varepsilon)}{(1-\varepsilon)}} \\ \Delta V_2 &= \frac{1}{m_2} \sqrt{2E_d m_c \frac{(1+\varepsilon)}{(1-\varepsilon)}} \end{aligned} \quad (2.46)$$

Facendo il rapporto tra l'energia restituita e quella assorbita nelle rispettive fasi dell'urto e ricordando l'espressione del coefficiente di restituzione si può anche scrivere:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{E_r}{E_a}} \quad (2.47)$$

### 2.2.2 Modello a due gradi di libertà

Quando le velocità non giacciono su una stessa retta, non è più possibile descrivere l'urto con un modello ad un grado di libertà ma bisogna considerare le grandezze sul piano stradale. Con queste considerazioni i veicoli si trattano come corpi aventi massa concentrata in modo da trascurare gli effetti dovuti alle rotazioni intorno all'asse perpendicolare al piano. Per analizzare gli urti a due gradi di libertà si utilizzano, come per gli urti ad un grado di libertà, le equazioni di moto e la conservazione dell'energia. Consideriamo due corpi che collidono in un punto individuato nella figura 2.2 con la lettera Q, con velocità iniziali  $V_1$  e  $V_2$ . Si definisce piano d'impatto il piano perpendicolare alla velocità relativa iniziale  $V_R$ . Prendiamo un sistema di riferimento cartesiano X-Y centrato in Q con l'asse X giacente sul piano di impatto. Lungo tale piano le componenti della velocità  $V_x$  sono uguali.

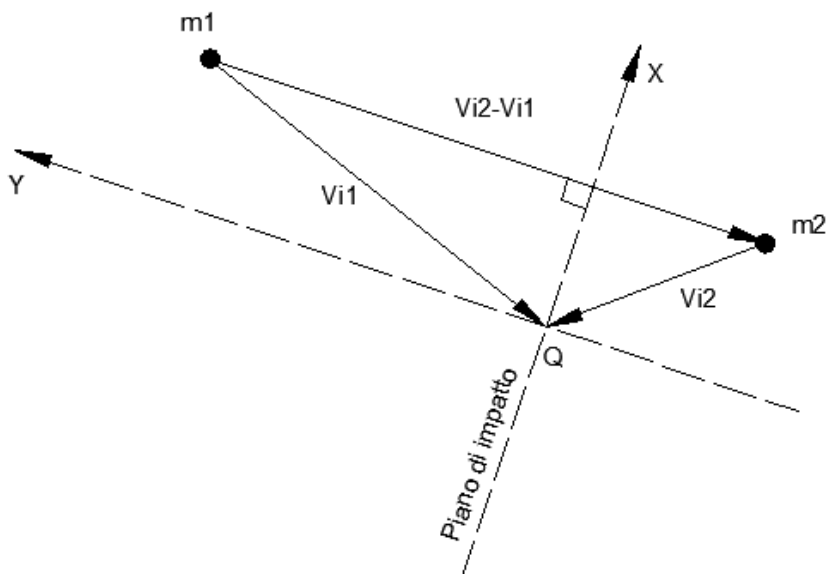


Figura 2.2 – Piano di impatto e di restituzione.

Consideriamo il caso in cui la componente della forza di contatto lungo tale asse sia nulla e quindi sia nullo il relativo impulso. Di conseguenza non si ha variazione di velocità dei corpi in questa direzione. Quindi si può scrivere:

$$V_{i1x} = V_{i2x} = V_{f1x} = V_{f2x} \quad (2.48)$$

dove i simboli soprastegnati si riferiscono all'istante finale. Lungo l'asse X le velocità sono determinate, noto un valore iniziale o finale. Il problema si riconduce quindi ad un caso monodimensionale in quanto bisogna analizzare le velocità lungo l'asse Y dove agirà una forza impulsiva che provoca una variazione di velocità. La conservazione della quantità di moto lungo Y implica:

$$m_1 V_{i1y} + m_2 V_{i2y} = m_1 V_{f1y} + m_2 V_{f2y} \quad (2.49)$$

Così come fatto per il caso monodimensionale, si può definire un coefficiente di restituzione relativo alle componenti lungo l'asse Y:

$$\epsilon = \frac{V_{f1y} - V_{f2y}}{V_{i2y} - V_{i1y}} \quad (2.50)$$

Dove, anche in questo caso,  $0 \leq \epsilon \leq 1$ . La 2.50, nella forma:

$$\epsilon(V_{2y} - V_{1y}) = V_{f1y} - V_{f2y} \quad (2.51)$$

e la 2.49, permettono di ricavare le velocità finali a partire dalle velocità iniziali.

In figura 2.3 è riportato un diagramma delle velocità prima e dopo l'urto, per un dato valore di  $\epsilon$ .

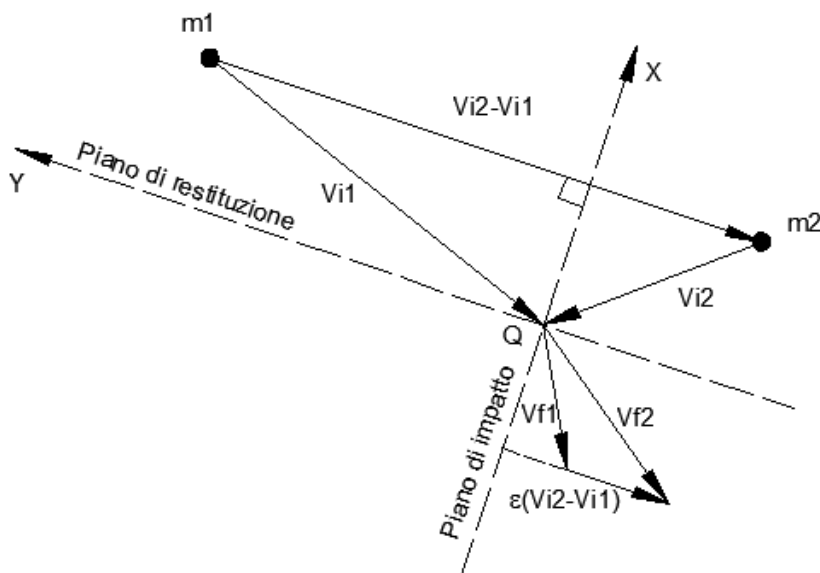


Figura 2.3 - Vettori delle velocità prima e dopo l'urto per un dato valore di  $\epsilon$ .

Tipicamente nella ricostruzione degli incidenti si deve risolvere il problema inverso, cioè sono incognite le velocità iniziali mentre le velocità finali possono essere stimate analizzando la fase post urto. In questi casi non è possibile conoscere a priori l'orientazione del piano di impatto.

Si sceglie un sistema di riferimento diverso definito dagli assi  $r$ - $s$  orientato in modo arbitrario; tale assunzione comporta avere, in generale, una restituzione lungo un asse e scorrimento lungo l'altro asse.

Si definisce piano di restituzione il piano su cui giace l'asse  $r$  e piano di scorrimento quello su cui giace l'asse  $s$ . L'asse  $s$  viene fatto coincidere con le superfici di contatto dei veicoli al momento dell'urto e l'asse  $r$  perpendicolare come mostrato in figura 2.4.

Si può scrivere la conservazione della quantità di moto lungo i due assi:

$$\begin{aligned} m_1 V_{i1r} + m_2 V_{i2r} &= m_1 V_{f1r} + m_2 V_{f2r} \\ m_1 V_{i1s} + m_2 V_{i2s} &= m_1 V_{f1s} + m_2 V_{f2s} \end{aligned} \quad (2.52)$$

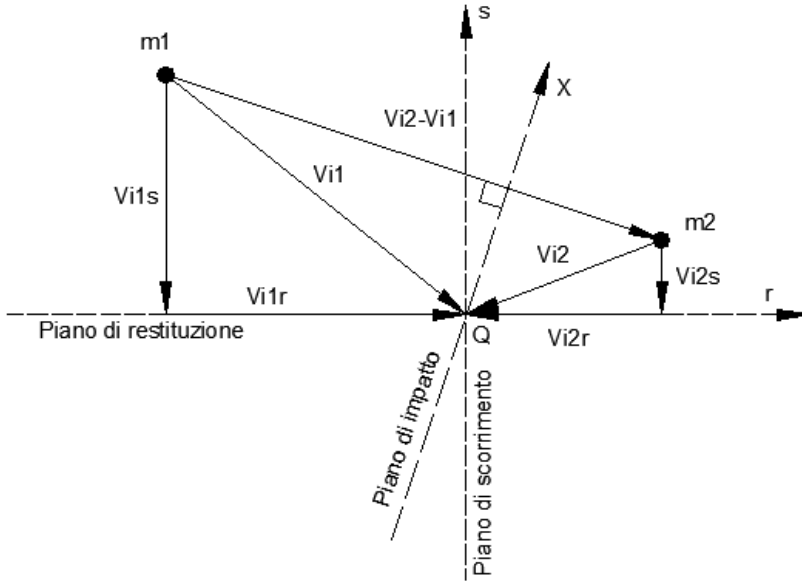


Figura 2.4 – Piano di restituzione e scorrimento.

dove il pedice r e s indicano rispettivamente le componenti lungo l'asse di restituzione e di scorrimento. Queste equazioni legano le componenti delle velocità iniziali dei veicoli a quelle finali ma essendoci due componenti di velocità per ogni corpo si hanno quattro incognite.

Si possono definire due coefficienti lungo i rispettivi assi che legano le componenti delle velocità prima e dopo l'urto. Infatti, definendo il coefficiente di restituzione  $\epsilon$  e di scorrimento  $\sigma$  come segue:

$$\epsilon(V_{i2r} - V_{i1r}) = V_{f1r} - V_{f2r} \quad \sigma(V_{i2s} - V_{i1s}) = V_{f1s} - V_{f2s} \quad (2.53)$$

si ottiene che le 2.52 e 2.53 formano un sistema lineare di quattro equazioni da cui è possibile ricavare le quattro componenti di velocità iniziali incognite. In figura 2.5 è coefficienti di restituzione e di scorrimento.

Come si può intuire, i valori delle velocità possono variare enormemente in base ai valori assegnati a due coefficienti. Il coefficiente di scorrimento, essendo

legato all'energia dissipata a causa dello scorrimento relativo tra i veicoli, risulta ignoto e non ci sono metodi affidabili per stimarlo; la scelta di tale coefficiente risulta arbitraria e lasciata al giudizio e all'esperienza del tecnico.

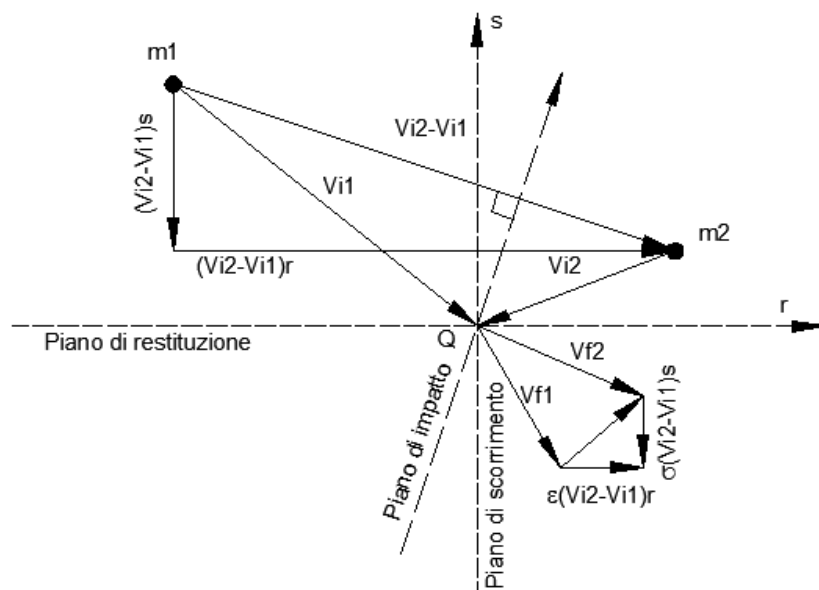


Figura 2.5 - Velocità prima e dopo l'urto in funzione dei valori dei coefficienti di restituzione e di scorrimento.

Analizzando urti nel piano è possibile risalire ad un'espressione che lega l'energia di deformazione alle componenti della velocità relativa. Tale espressione risulta però dipendente da due o più coefficienti che il tecnico ricostruttore deve scegliere in base all'esperienza ed inoltre tali espressioni risultano molto sensibile e vengono poco utilizzate.

È possibile analizzare l'urto prendendo in considerazione gli effetti dovute alle rotazioni dei corpi intorno all'asse normale al piano stradale effettuando una schematizzazione a tre gradi di libertà del sistema; ulteriori grandezze affette da incertezza, quali le velocità angolari e i momenti d'inerzia dei corpi, devono essere prese in considerazione nell'urto aumentando la complessità e sensibilità dell'analisi.



## 2.3 Metodi di valutazione dell'energia di deformazione

Precedentemente è stato analizzato l'urto tra due veicoli attraverso modelli impulsivi, schematizzando i mezzi come corpi ad uno o a due gradi di libertà; seguendo tale approccio non si fa nessun riferimento alle caratteristiche strutturali dei veicoli coinvolti e di conseguenza non è possibile ricavare nessuna informazione sulle forze e le deformazioni che verificano durante l'impatto.

Per descrivere il fenomeno dell'urto e ricavare le relative grandezze fisiche, è necessario analizzare quello che succede nel tempo durante il quale i veicoli sono a contatto, considerando la risposta strutturale dei singoli veicoli; alla luce di questo approccio risulterà di grande interesse la valutazione del legame che intercorre tra forze scambiate tra le superfici di contatto e deformazioni permanenti, in particolar modo valutare l'energia cinetica dissipata nell'impatto

L'energia di deformazione risulta una grandezza fisica fondamentale nell'ambito della ricostruzione degli incidenti stradali; è utilizzabile sia come variabile di ingresso che come parametro di verifica a posteriori qualora si preceda, ad esempio, nel percorso di backward calculation attraverso i modelli impulsivi. Nella trattazione tramite i modelli impulsivi, impostando il bilancio energetico pre e post urto si ottiene che l'energia cinetica non si conserva. La quota parte di energia che genera tale differenza è proprio il lavoro di deformazione. Si ricorre all'analisi delle deformazioni dei veicoli in quanto queste sono causate dal lavoro di deformazione.

Negli urti tra autoveicoli e motoveicoli purtroppo la determinazione dell'energia dissipata nelle deformazioni è spesso un compito difficile. La dissipazione di energia cinetica legata alla deformazione subita dal motoveicolo è difficile da quantificare così come quella dell'auto, sulla quale generalmente si producono deformazioni localizzate, che possono coinvolgere parti, come ad esempio la zona delle ruote, con rigidzze completamente differenti rispetto a quelle su cui normalmente vengono eseguite le prove di crash. In tali zone i metodi classici come quelli derivanti dall'approccio di Campbell [11-15] non sono applicabili per la mancanza dei parametri di rigidzza.

I cosiddetti metodi Energy Equivalent Speed (EES) [16-18] non sono sempre applicabili in caso di collisioni auto-moto perché richiedono per la loro risoluzione deformazioni di riferimento, simili per gravità e tipologia a quelle presenti sui veicoli in oggetto di studio, non facilmente disponibili. Infatti, in letteratura non esistono database ampi con danni di riferimento per le possibili deformazioni di auto e moto anche perché non sono diffusi i crash test su mezzi a due ruote.

Gli studi in questo tipo di urti tendono ad analizzare separatamente i due veicoli coinvolti calcolando l'energia cinetica globalmente dissipata come somma dei singoli contributi energetici dissipati dai due veicoli:

$$E_d = E_{d,M} + E_{d,A} \quad (2.54)$$

dove  $E_{d,M}$  è l'energia cinetica dissipata dal motoveicolo e  $E_{d,A}$  l'energia cinetica dissipata dall'autoveicolo.

Tra le prime ricerche in questo campo compaiono quelle condotte da Severy [19] il quale individuò sperimentalmente una correlazione tra velocità di impatto e deformazione del passo del motoveicolo. Altre campagne di prove tra moto e barriera [20-22] e tra moto e auto [21, 23], sono state condotte al fine di definire con maggior precisione il rapporto empirico tra EES e accorciamento del passo.

In [23] vengono presentate due formulazioni indipendenti, determinate statisticamente sulla base di alcuni crash test presenti in letteratura. Il metodo di Wood [23] è stato sviluppato analizzando i dati di numerosi crash test con mezzi a due ruote con barriera e con auto. L'energia di deformazione dell'urto viene calcolata come somma dell'energia di deformazione dell'auto e della moto (o scooter). L'energia assorbita dal mezzo a due ruote è stata ricavata analizzando 43 crash test di scooter e motocicli contro barriera rigida. La relazione è stata ricavata correlando la variazione di passo ( $\Delta p$ ) del mezzo a due ruote con l'energia specifica  $E_{d,M}/M$  (energia per unità di massa del mezzo a due ruote). Il risultato ottenuto dall'analisi è riportato in figura 2.6.

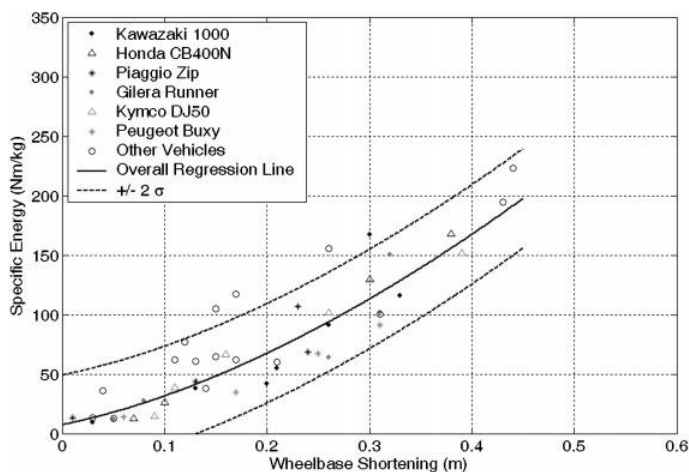


Figura 2.6 - Correlazione tra variazione di passo ed energia specifica.

L'analisi di regressione effettuata per i 43 crash test ha portato alla seguente relazione:

$$\frac{E_{d,M}}{M} = 641,7(\Delta p + 0,1)^{1,89} \quad (2.55)$$

Dove il pedice M si riferisce al motociclo (o scooter). Il coefficiente di correlazione  $r^2$  risulta 0,845. Inoltre sono rappresentate le curve con intervallo di variabilità  $\pm 2\sigma$  con  $\sigma = 20,64 \text{ J/kg}$ .

Per quanto riguarda l'energia assorbita dall'autoveicolo  $E_{d,A}$  sono stati analizzati 31 crash test di scooter e motocicli che urtano autoveicoli fermi. La relazione è stata ricavata correlando la deformazione massima normale sull'autoveicolo C con l'energia assorbita dallo stesso  $E_{d,A}$ . Il risultato ottenuto è visibile in figura 2.7.

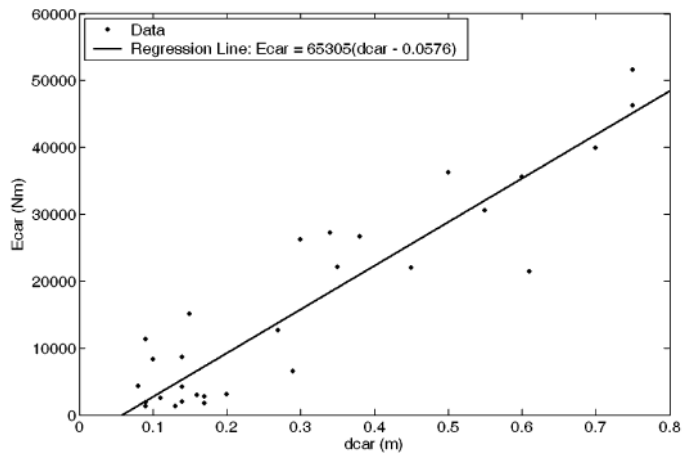


Figura 2.7 - Correlazione tra deformazione auto ed energia assorbita.

Come si nota dalla figura esiste una correlazione lineare tra deformazione massima C e l'energia specifica  $E_{d,A}$ . Infatti si ha:

$$E_{d,A} = 65305(C - 0,0576) \quad (2.56)$$

Con  $r_2 = 0,845$  e deviazione standard  $\sigma = 6026 \text{ J}$ . Dalla relazione si nota che l'energia assorbita dall'auto è indipendente dalla massa dei corpi. L'equazione 2.37 è valida per  $C > 0,0576 \text{ m}$ . Per deformazioni minori Wood ha ottenuto, tramite regressione, che esiste una correlazione lineare tra il rapporto  $E_{d,A}/E_d$  (dove  $E_d = E_{d,A} + E_{d,M}$ ) con la velocità relativa prima dell'urto. I risultati sono visibili in figura 2.8.

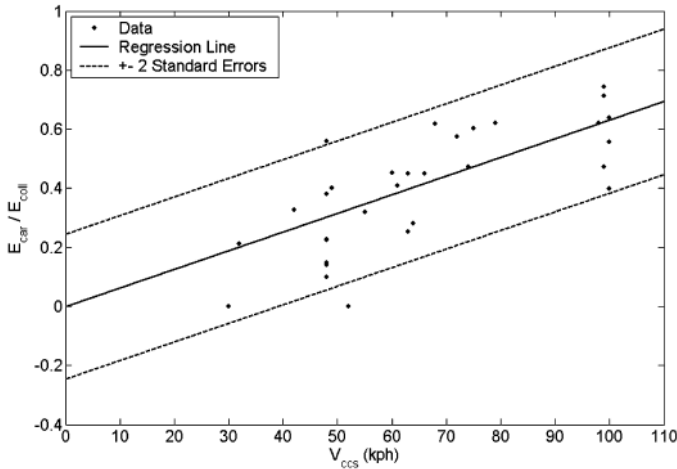


Figura 2.8 - Correlazione tra il rapporto tra l'energia assorbita dall'autoveicolo e l'energia assorbita totale e la velocità relativa prima dell'urto.

Nell'approccio presentato in [23], nel computo della stima dell'energia di deformazione dissipata dall'autoveicolo, non viene tenuto conto della zona in cui si hanno le deformazioni, ovvero della rigidità del mezzo in quel particolare punto. Inoltre il metodo, non tiene in considerazione della moto e del suo accorciamento del passo sempre per la stima dell'energia assorbita dall'auto.

## 2.4 Energia cinetica dissipata dal motoveicolo

La determinazione dell'energia cinetica dissipata dal mezzo a due ruote avviene tipicamente attraverso la conoscenza del valore di EES del danno in oggetto:

$$E_{d,M} = \frac{1}{2} m_M (EES)^2 \quad (2.57)$$

Per i casi in cui nei motoveicoli si verifica la deformazione delle forche anteriori, senza la rottura del canotto o del telaio, la valutazione dell'EES viene fatta attraverso correlazioni empiriche tra accorciamento complessivo del mezzo ed EES o tra accorciamento del passo ed EES. Tali relazioni sono state determinate per moto e scooter attraverso dei crash test contro barriera rigida [20-22]. La relazione tra accorciamento del passo ed EES appare migliore, meno dispersa, rispetto a quella tra accorciamento complessivo del mezzo e EES e risulta di facile applicazione per il calcolo dell'energia dissipata dal motoveicolo.

Le prove svolte in [20-22] prevedono urti tra veicoli a due ruote e barriera rigida indeformabile. Esse si differenziano per la modalità con cui il mezzo viene portato all’impatto contro l’ostacolo fisso. In [20, 22] la tecnica adoperata per ricercare tali relazioni è la cosiddetta “prova del pendolo”. Il motociclo, senza dummy, viene agganciato ad un cavo collegato ad un primo braccio telescopico. Un altro braccio telescopico viene usato per portare in sospensione il mezzo. Raggiunta l’altezza desiderata, attraverso un sistema di sgancio automatico, si libera il veicolo il quale va ad impattare contro una barriera rigida inamovibile, solitamente costituita da un blocco di cemento armato (vedi figura 2.9)

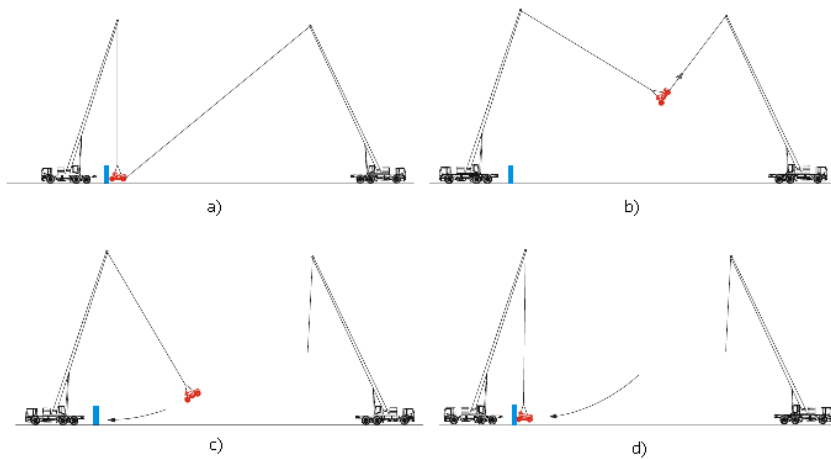


Figura 2.9 - Fasi della “prova del pendolo”: a) aggancio; b) messa in sospensione; c) sgancio; d) impatto.

In [21] le moto vengono trainate grazie ad un braccio saldato su un lato di un carrello movimentato da un autoveicolo (figura 2.10). Delle cinghie regolabili, oltre a sorreggere il motoveicolo in posizione verticale con la ruota anteriore leggermente scostata da terra, rendono flessibile l’attacco tra il manubrio ed il braccio. La forza anteriore, durante la rincorsa, possiede un’estensione maggiore rispetto a quella normale di marcia a causa della sospensione da terra della ruota anteriore. Sulla moto non è stata posta alcuna zavorra che simulasse la presenza del pilota.



Figura 2.10 – Metodo di lancio utilizzato nelle prove contro barriera rigida in [21].

Nelle tabelle seguenti vengono riportati i dati relativi a due diverse campagne di test. La tabella 2.1 mostra i risultati delle prove svolte su 26 scooter, trattate Priester [22].

Tabella 2.1 – crash test tra scooter e barriera rigida.

N° prova	Modello	Massa (kg)	EES (km/h)	$\Delta p$ (m)
1	PIAGGIO NRG	87,0	18,2	0,045
2	PIAGGIO NRG	99,0	31,4	0,140
3	PIAGGIO NRG	87,0	41,0	0,145
4	PIAGGIO NRG	74,0	51,9	0,150
5	PIAGGIO NRG	87,0	55,1	0,165
6	PIAGGIO ZIP	69,0	18,4	0,010
7	PIAGGIO ZIP	66,0	33,6	0,125
8	PIAGGIO ZIP	71,0	42,2	0,235
9	PIAGGIO ZIP	73,0	52,6	0,230
10	GILERA RUNNER	87,0	17,6	0,050
11	GILERA RUNNER	91,0	26,8	0,075
12	GILERA RUNNER	88,0	40,7	0,255
13	GILERA RUNNER	94,0	51,3	0,305
14	GILERA RUNNER	90,0	62,4	0,320
15	KYMC0 DJ 50	70,0	19,5	0,090

N° prova	Modello	Massa (kg)	EES (km/h)	$\Delta p$ (m)
16	KYMCO DJ 50	75,0	31,7	0,110
17	KYMCO DJ 50	72,0	41,6	0,160
18	KYMCO DJ 50	71,0	51,3	0,260
19	KYMCO DJ 50	69,0	62,7	0,390
20	PEUGEOT BUXY	77,0	19,0	0,055
21	PEUGEOT BUXY	82,0	30,0	0,170
22	PEUGEOT BUXY	67,0	41,7	0,245
23	PEUGEOT BUXY	80,0	48,7	0,310
24	APRILLIA SR 50	96,0	18,5	0,030
25	APRILLIA RALLY	85,0	30,6	0,035
26	APRILLIA RALLY	80,0	39,5	0,205

La tabella 2.2, mostra invece i risultati di crash svolti da Kasaniski e Adamson [20 e 21] su delle moto.

Tabella 2.2 – crash test tra moto e barriera rigida.

N° prova	Modello	Massa (kg)	EES (km/h)	$\Delta p$ (m)
27	YAMAHA XS 400	169,0	50,0	0,310
28	SUZUKI GSX 250	149,0	38,0	0,170
29	SUZUKI GSX 250	158,0	24,0	0,100
30	HONDA CB 400 N	169,0	17,0	0,070
31	HONDA CB 400 N	169,0	65,0	0,380
32	HONDA CB 400 N	155,0	70,0	0,430
33	KAWASAKI 1000	220,0	13,3	0,028
34	KAWASAKI 1000	223,0	49,0	0,260
35	KAWASAKI 1000	231,0	33,1	0,133
36	KAWASAKI 1000	224,0	37,1	0,209
37	KAWASAKI 1000	229,0	33,1	0,203
38	KAWASAKI 1000	230,0	55,8	0,330

La tendenza dell'EES in funzione dell'accorciamento del passo del mezzo a due ruote è praticamente lineare; il valore dell'Energy Equivalent Speed aumenta all'aumentare della deformazione. Nella figura 2.11 in rosso sono riportati i dati relativi alle prove eseguite con le moto e in blu quelle con gli scooter. Dai dati trovati in letteratura tecnica l'andamento sembra indipendente dal valore della massa del veicolo, dalla cilindrata e anche dal tipo di mezzo a due ruote, valendo sia per gli scooter che per motociclette da strada o fuoristrada.

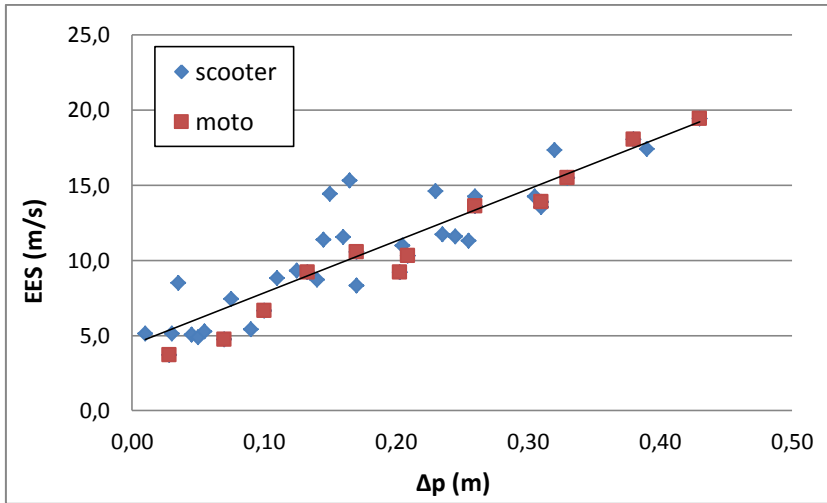


Figura 2.11 - Correlazione sperimentale con dati di letteratura tra accorciamento del passo e EES ottenuto attraverso crash test contro barriera rigida. I simboli rossi sono riferiti a motociclette, quelli blu a scooter.

I dati di letteratura sono relativi a valori della variazione del passo del motociclo fino a circa 0,40 m. Nel caso in cui i due tubi della forcella anteriore subiscono flessioni differenti, il valore della variazione del passo  $\Delta p$  è stato assunto come valore medio tra i valori delle misurazioni fatte da ambedue i lati.

L'equazione della retta di best fit dei dati sperimentali riportati in figura 2.11 è:

$$EES = 4,40 + 34,49\Delta p \quad (2.58)$$

Il coefficiente di determinazione è  $r^2=0,83$ . La dispersione dei punti attorno alla retta può essere misurata con la somma dei residui al quadrato. La stima della varianza degli errori,  $\sigma^2$  è la quantità  $s^2$  data da:

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n-2} \quad (2.59)$$

I dati sperimentali con cui è stata ricavata la correlazione empirica mostrano una deviazione standard di  $s=1,78\text{m/s}$ .



### 2.4.1 Analisi critica dei dati di letteratura

I dati di letteratura sopra citati si presentano non omogenei sia per le diverse modalità di prova sia per la presenza di alcuni casi, ritenuti anomali, in cui il veicolo arriva all'urto in posizione tale da falsare parzialmente i risultati cercati.

La diversità dei mezzi utilizzati, scooter e moto (Piaggio, Gilera, Kymco, Peugeot, Aprilia, Yamaha, Honda e Suzuki), per le prove contro barriera rigida, in relazione al numero non elevatissimo delle prove reperibili, ha escluso l'utilizzo di analisi statistiche per la individuazione di eventuali dati anomali. Al fine di definire una migliore correlazione tra EES ed accorciamento del passo del motoveicolo, sono stati analizzati inizialmente i singoli crash test riportati in letteratura ed è stata eseguita una scrematura delle prove analizzando singolarmente l'andamento della prova stessa, con l'ausilio dei report dei filmati e della documentazione fotografica.

Sono stati scartati sia i test in cui il comportamento del motoveicolo era considerevolmente differente da quello solitamente tenuto durante la maggior parte delle prove, sia i test in cui il veicolo ha subito rotture di componenti strutturali, creando così un accorciamento del passo non più imputabile alla sola flessione plastica della forcella.

In particolare sono stati eliminati dallo studio le prove in cui si sono verificate rotture della forcella o del collegamento saldato tra canotto e telaio e, nelle prove condotte da Priestler [22], i test che a causa della metodologia di lancio adottata vedevano il motoveicolo giungere all'impatto con il fianco destro o sinistro o con la ruota completamente sterzata, generando scivolamenti del veicolo o deformazioni della forcella in direzione tangenziale (figura 2.12).

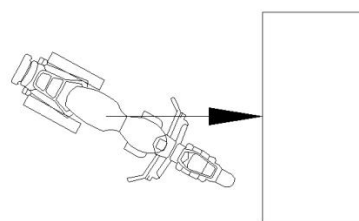
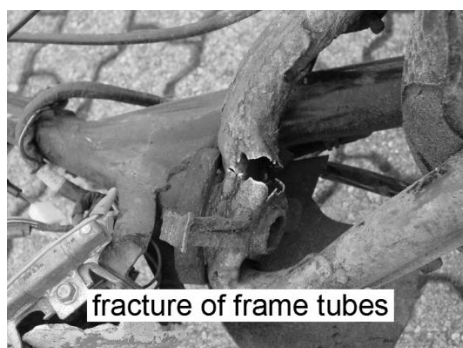


Figura 2.12 – Esempi di rottura del telaio e di arrivo all'urto in posizione non corretta.

### 2.4.1.1 Prove discordanti

Analizzando attentamente tutte le prove prese in considerazione, si è riscontrato in alcune di esse un comportamento differente da quello tenuto solitamente dai motoveicoli durante lo stesso tipo di prova; si sottolinea il fatto che le prove analizzate che non sono state svolte durante questo studio, sono state tutte realizzate con il metodo del pendolo, infatti solo le prove condotte da Adamson [21] sono state svolte con la procedura tradizionale, ma purtroppo questo studio non è stato corredato né di una documentazione fotografica, né filmati relativi alle prove eseguite. Non si è potuta pertanto eseguire alcuna analisi sulle prove derivanti da questa campagna di test.

Partendo dalle prove realizzate da Priester e Weide su scooter [22], si riscontrano alcune prove in cui il comportamento del mezzo risulta ambiguo, se si pensa alla stima dell'energia di deformazione che caratterizza il mezzo, in funzione dell'accorciamento del passo riportato.

Analizzando la prova che ha come oggetto il Piaggio NRG, che impatta la barriera alla velocità di 41km/h si nota, che il cerchio anteriore risulta gravemente danneggiato a seguito dell'urto, ciò sta a significare che l'energia di deformazione che caratterizza il veicolo durante l'urto, non ha contribuito soltanto alla riduzione del passo del veicolo, ma anche alla rottura del cerchio anteriore (figura 2.13).



Figura 2.13 - Danneggiamento del cerchio anteriore a seguito dell'urto.

Si può anche supporre che tale rottura abbia causato, una volta verificatasi, l'interruzione della deformazione caratteristica delle forcelle anteriori.

Nei test sui Piaggio NRG a 51,9km/h (figura 2.14) e a 55,1km/h (figura 2.15) si nota in ambedue le prove la rottura di elementi strutturali come le forche o il canotto di sterzo. In questi casi la dissipazione di energia non può essere imputata esclusivamente alla riduzione del passo del motociclo.



Figura 2.14 – Rottura forche a seguito dell'urto.



Figura 2.15 – Rottura canotto di sterzo a seguito dell'urto.

Passando all'analisi della prova riguardante il Piaggio Zip, con velocità di impatto pari a 33,6 km/h, si nota che l'accorciamento del passo è stato interrotto dal contatto della ruota anteriore con il telaio del motoveicolo (figura 2.16). La pressione della ruota contro il telaio è stata piuttosto elevata, in quanto si può notare un danneggiamento notevole dello pneumatico, in tal caso la riduzione del passo dello scooter, non potrà più, come detto in precedenza, costituire un indicatore importante per la valutazione dell'energia specifica di deformazione.



Figura 2.16 - La ruota anteriore impatta contro il telaio del motoveicolo limitando l'accorciamento del passo.

Anche la prova che ha sempre come oggetto un Piaggio Zip, ma con velocità di impatto pari a 52,6km/h, presenta delle particolarità rispetto alle altre. Si nota che, durante l'urto, la ruota anteriore viene violentemente a contatto con il telaio del motoveicolo, causando la deformazione sia dello pneumatico sia del cerchio, nella zona venuta a contatto con la barriera, in aggiunta si riscontra anche un cedimento della forcella nella parte sinistra (figura 2.17). Anche in questo caso, si può affermare che il quantitativo di energia di deformazione assorbita dal motoveicolo non è attribuibile soltanto all'accorciamento del passo del veicolo, ma anche ai cedimenti riportati sopra.



Figura 2.17 - Dettaglio della forcella, in seguito all'urto.

La prova riguardante il Gilera Runner, con velocità di inizio urto pari a 26,8km/h, è invece caratterizzata da una modalità di impatto particolare: lo scooter impatta infatti la barriera con la ruota anteriore leggermente sterzata verso destra. A causa di questo particolare, non appena si verifica l'impatto, la ruota sterza completamente portando la forcella direttamente a contatto con la barriera; si riscontra quindi una flessione della forcella in direzione trasversale anziché longitudinale (figura 2.18). Questa tipologia di deformazione risulta incompatibile

con quelle riportate generalmente dai motoveicoli durante le prove di crash test, in quanto l'accorciamento del passo risulterà inevitabilmente minore di quello che si sarebbe riscontrato, nel caso in cui l'impatto fosse avvenuto con lo sterzo dritto come si ha di solito.



Figura 2.18 - Vista post urto dello scooter.

Il crash test riguardante il Gilera Runner, con velocità di inizio urto di 62,4km/h, avviene invece con la ruota anteriore leggermente sterzata verso sinistra. Il comportamento del mezzo è simile a quello riscontrato nella prova descritta in precedenza, ma data l'elevata velocità a cui è stato eseguito il test, tutta la parte anteriore del motoveicolo viene a contatto con la barriera, provocando deformazioni distribuite in tutta questa zona; oltre a queste deformazioni se ne notano altre distribuite in vari punti del telaio, anche nella zona posteriore, dato che esso è venuto direttamente a contatto con l'ostacolo (figura 2.19). Le molteplici deformazioni riportate dal mezzo suggeriscono quindi, che la stima dell'energia di deformazione effettuata tramite il legame con l'accorciamento del passo, porterà ad un valore decisamente inferiore rispetto a quello che realmente caratterizza un impatto avvenuto a questa velocità.





Figura 2.19 - Vista post urto del motoveicolo.

La prova riguardante il Kimco Dj, con velocità di impatto pari a 31,7km/h, presenta una posizione del motoveicolo al momento dell'urto, incongruente con quelle assunte dalla maggior parte dei veicoli in prova; si nota infatti che la ruota anteriore del mezzo, si trova in posizione più alta rispetto a quella posteriore. Il veicolo impatta quindi la barriera in posizione obliqua, causando probabilmente una deformazione delle forcelle maggiore rispetto a quella che si dovrebbe riscontrare a tale velocità.

Si nota invece, una deformazione importante del cerchio anteriore nella prova riguardante il Kymco DJ, che impatta la barriera alla velocità di 41,6km/h. L'urto avviene in maniera regolare anche se, come nella prova analizzata in precedenza, la posizione del mezzo nel momento in cui viene a contatto con la barriera non rappresenta in maniera precisa un urto reale, si nota infatti che il veicolo non impatta perpendicolarmente la barriera, ma che al momento dell'urto la parte anteriore si trova in posizione rialzata rispetto a quella posteriore, ciò espone maggiormente le forcelle dello scooter alla deformazione. A causa, probabilmente, di questa modalità di impatto, si riscontra una deformazione del cerchio anteriore dovuta al contatto con il telaio del motoveicolo (Figura 2.20).



Figura 2.20 - Vista post urto del motoveicolo.

Un comportamento ambiguo, si riscontra anche nella prova riguardante ancora un Kymco DJ, questa volta la velocità di impatto è pari a 51,3km/h. Analizzando il filmato, si nota subito che l'impatto con la barriera avviene sul lato destro del motoveicolo, esso sembra come scivolare sulla barriera durante l'urto, portando alla fine a contatto anche la sua parte posteriore. L'analisi fotografica post urto evidenzia che il veicolo non ha impattato la barriera nella direzione convenzionale, si nota infatti che la ruota anteriore si è, durante la deformazione della forcella, spostata verso sinistra andando a deformare anche il sostegno sottostante la pedana, causando anche la rottura di quest'ultima (figura 2.21).



Figura 2.21 - La forcella non subisce una deformazione consona, a causa della errata direzione di impatto del mezzo.

L'ultima prova analizzata riguarda un Aprilia Rally, esso impatta la barriera rigida alla velocità di 30,6km/h. Osservando la documentazione fotografica, si nota che il veicolo non ha in questo caso supportato l'urto come dovrebbe; si possono notare diverse tipologie di cedimenti in tutta la zona anteriore del veicolo.

Analizzando invece le prove svolte su moto riportate in [20], l'unico test anomalo risulta quello condotto su una Suzuki GSX 250 a 70km/h. In questo test si evidenzia la rottura del telaio nelle giunzioni saldate e quindi un quantitativo di energia dissipata non imputabile solamente alla deformazione plastica delle forche (figura 2.22).



Figura 2.22 – Dettaglio del test condotto su Suzuki GSX 250 a 70km/h.



A seguito della scrematura dei dati di letteratura, è stata riscontrata una migliore correlazione lineare (vedi figura 2.23) tra l'accorciamento del passo  $\Delta p$  e il valore di EES con  $R^2$  pari a 0,96 e una deviazione standard pari a 0,83. Questa relazione appare essere indipendente dalla massa della moto, dalla sua cilindrata e anche dal tipo di veicolo a due ruote: motociclo, ciclomotore, scooter.

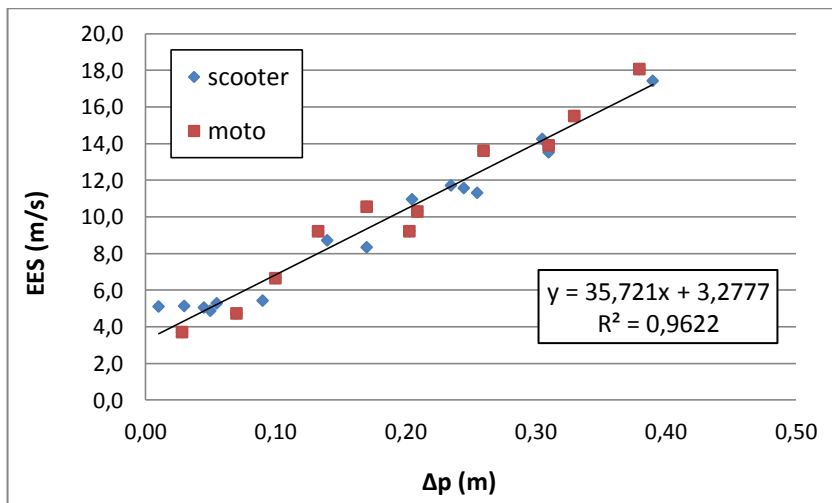


Figura 2.23 - Correlazione sperimentale con dati di letteratura tra accorciamento del passo e EES, a seguito di scrematura, ottenuto attraverso crash test contro barriera rigida.

## 2.4.2 Integrazione dei dati di letteratura tecnica

Ad integrazione dei dati di letteratura è stata effettuata una campagna di prove tra motoveicoli e barriera rigida presso la pista di crash dell'Università di Firenze. Oltre ad aumentare il numero di prove tra moto e barriera rigida, le prove sono state condotte anche con il duplice obiettivo di:

- valutare la possibile influenza dello stato di estensione o meno delle forche durante l'impatto sull'accorciamento della moto, in modo da riprodurre le configurazioni di urto di un veicolo frenato o non frenato;
- identificare i punti di contatto e il relativo scambio di forze tra moto e barriera rigida.

Per la realizzazione delle prove svolte in questo studio, è stato deciso di adottare un metodo differente dai comuni metodi di lancio precedentemente visti.

Si è ritenuto infatti che, al fine di rendere la prova più realistica, il motoveicolo dovesse arrivare all'impatto con la barriera con un assetto più simile possibile a quello assunto generalmente durante un incidente stradale, salvo per la presenza del guidatore; ovvero percorrendo il tratto fino alla barriera in equilibrio sulle proprie ruote e supportando da solo il proprio peso, in modo che la sospensione anteriore non risultasse completamente scarica, esponendo in maniera maggiore l'avantreno ad una eventuale deformazione. Oltre a ciò è stata installata, nella parte frontale del blocco di cemento, una barriera in acciaio strumentata dotata di 3 celle di carico estensimetriche in modo da poter monitorare le forze in gioco durante l'urto e i punti di contatto tra moto e barriera (figura 2.24).



Figura 2.24 - Panoramica della prova.

Questa barriera è stata realizzata con una lastra di acciaio di dimensioni 80 x 120cm, sulla parte posteriore della quale, sono state installate le tre celle di carico estensimetriche disposte a triangolo, con il vertice rivolto verso l'alto. Questa disposizione consente di valutare l'andamento della forza con cui il motoveicolo impatta la barriera, mediante la somma dei valori di picco ottenuti dalle tre celle di carico.

L'utilizzo di questa barriera strumentata è stato limitato solo ad un certo numero di prove.

Le prove di crash test realizzate per questo studio, sono state svolte presso il Polo Scientifico di Sesto Fiorentino, all'interno del LaSIS (Laboratorio per la Sicurezza e l'Infortunistica Stradale). Per prima cosa è stato necessario installare la barriera, questa è stata applicata sul frontale di un blocco in cemento fissato al terreno, in modo che tutta l'energia sviluppata nell'urto venga ripartita sul motoveicolo; questo particolare risulta fondamentale per le successive elaborazioni dei dati, assumendo infatti che la barriera non subisca spostamenti, si può affermare che tutta l'energia cinetica accumulata dal veicolo prima dell'urto venga restituita, anche se sotto forma di varie tipologie di energia, completamente al veicolo. In particolare, nel caso in cui il motoveicolo abbia una velocità post-urto nulla, ovvero considerando l'urto anelastico, l'energia cinetica caratteristica del mezzo prima dell'urto verrà interamente convertita in energia di deformazione; si vedrà poi dall'analisi dei filmati ottenuti dalle prove, che questa considerazione non è sempre verificata, in quanto la componente elastica che caratterizza il veicolo tende a farlo rimbalzare contro la barriera, allontanandolo da questa con velocità che spesso non possono essere trascurate.

Le tre celle di carico sono state posizionate nella zona posteriore della barriera, con la faccia piana a contatto con essa e la faccia dotata di semisfera a contatto con il blocco in cemento (figura 2.25), le celle sono state disposte in modo da formare un triangolo con il vertice rivolto verso l'alto; si hanno quindi 2 celle ad un'altezza di 20cm, una all'estremità destra e una a quella sinistra della piastra ed una ad un'altezza di 103cm posizionata sull'asse centrale della barriera. La piastra è stata assicurata al blocco in cemento tramite due piastre laterali, da fissarsi ai perni filettati che fuoriescono dal blocco stesso; il fissaggio della barriera, dovendo questa essere solidale al blocco imporrà un valore costante di precarico nelle celle, è necessario quindi non appena sarà collegata la strumentazione ritrovare lo zero tramite il software di acquisizione dati.



Figura 2.25 - Posizionamento della cella con relativa semisfera.

L'area di prova è stata poi corredata di due fotocellule per la rilevazione della velocità, posizionate sul bordo della pista a breve distanza dalla barriera, in modo che la velocità rilevata possa essere considerata equivalente a quella di impatto con la barriera; oltre alle fotocellule è stata utilizzata una telecamera ad alta velocità che svolge sia la funzione di fornire una visione dettagliata dell'urto, sia quella di garantire un'alternativa valida per rilevazione della velocità, alternativa utile come parametro di confronto con i dati ottenuti dalle fotocellule o in caso di loro malfunzionamento; si è scelto di filmare le prove anche con un'altra telecamera digitale per fornire una visuale di insieme della prova.

L'acquisizione dei dati rilevati dalle celle di carico è stata affidata ad una centralina esterna collegata ad un computer fornito di un apposito programma realizzato con LabView, al computer è affidata anche l'acquisizione dei filmati ad alta velocità e dei dati forniti dall'accelerometro, di cui verrà trattato in seguito.

I motoveicoli a disposizione per il crash test sono stati innanzitutto pesati, in quanto la mancanza di alcuni particolari può portare ad una variazione della massa rispetto al dato fornito dal costruttore, dopodiché è stato necessario prepararli alla prova singolarmente; la preparazione prevede diverse operazioni, alcune mirate alla successiva acquisizione dei dati, altre alla corretta realizzazione della prova dal punto di vista dinamico.

Per quanto riguarda l'acquisizione dei dati a posteriori, sono stati applicati sulla parte laterale del veicolo dei marker adesivi, questi non sono altro che semplici adesivi atti ad identificare un punto ben preciso sul mezzo in modo da

poter verificare, grazie anche all'aiuto dei filmati, gli spostamenti di questi punti anche in un momento successivo alle consuete misurazioni sul campo. Come è stato accennato in precedenza, nonostante la barriera strumentata sia di per se in grado di monitorare le forze in gioco durante l'urto, è stato pensato di rendere più completa la raccolta di informazioni riguardanti le forze installando su alcuni veicoli testati un accelerometro a tre assi, anche se in questo tipo di prova hanno rilevanza solo i dati relativi alla direzione di moto del veicolo; la posizione dell'accelerometro è stata valutata di volta in volta a seconda del tipo di motoveicolo in prova, è infatti fondamentale che l'accelerometro non sia esposto ad urti e che sia reso perfettamente solidale ad un elemento rigido del veicolo; l'accelerometro installato è di tipo piezoelettrico e valore di saturazione pari a 100G. i dati riguardanti gli accelerometri sono stati acquisiti alla frequenza di 10kHz.

Per far sì che la prova rappresenti in maniera fedele il caso reale è stato deciso di realizzare una serie di meccanismi che permettessero al veicolo di raggiungere la barriera in equilibrio e mantenendo le ruote a contatto con il terreno, in modo da simulare il caso reale in cui il mezzo è mantenuto in equilibrio dal guidatore.



Figura 2.26 - Braccio di sostegno dotato di sistema di sgancio.

Questa situazione è stata realizzata mediante l'uso di due bracci di sostegno, dotati di ruote da applicare alla parte posteriore del veicolo (figura 2.26),



i bracci sono fissati al mezzo tramite un telaio in acciaio, reso precedentemente solidale al veicolo tramite due barre filettate; affinché però il meccanismo di sostegno non vada ad influenzare la massa complessiva del veicolo durante l'impatto, è stato progettato un sistema di sgancio, comandato da corde che, azionato poco prima dell'urto, permette al veicolo di impattare la barriera in posizione verticale, senza accessori esterni che potrebbero modificarne il comportamento durante l'urto.

Questa soluzione è stata valutata la più idonea al fine di rappresentare la situazione reale di marcia del veicolo, che avanzerà sulle proprie ruote fino all'impatto con la barriera in modo che la sua posizione al momento dell'impatto sia molto simile a quella che assumerebbe nel caso fosse guidato da una persona.

L'avanzamento del motoveicolo verso la barriera è garantito da una corda, fissata per un capo all'anteriore della moto e per l'altro ad una puleggia collegata ad un elastico; naturalmente la corda di traino non deve in nessun modo interferire con il rotolamento della ruota anteriore del motoveicolo ed è quindi stata ancorata alla forca anziché alla ruota (figura 2.27).



Figura 2.27 - Configurazione di lancio.

Questa modalità di collegamento è stata scelta per la necessità di avere una forza di "tiro" più bassa, rispetto a quella necessaria per le comuni prove di crash test per autoveicoli; grazie alla puleggia si riesce infatti a dimezzare la forza

generata dall'elastico e raggiungere quindi velocità non troppo alte anche con mezzi di massa moderata come i motoveicoli (figure 2.28 e 2.29). Per quanto riguarda il posizionamento del mezzo nella posizione di partenza si è deciso di mettere in trazione l'elastico tramite un verricello elettrico, sul quale si avvolge un cavo di acciaio collegato alla ruota posteriore del motoveicolo; il sistema di lancio costituito dal verricello abbinato all'elastico si è rivelato una scelta ottimale, in quanto consente di avere un buon range di velocità modificando soltanto la posizione di partenza del mezzo.



Figura 2.28 - Vista posteriore della barriera in cemento.

Nelle prove svolte per la valutazione dell'effetto dello stato di escursione pre-urto delle sospensioni anteriori sulla relazione tra accorciamento del passo e EES, le forche sono state trattenute con una corda alla loro massima escursione (figura 2.30), al fine di simulare il caso di una forte frenata (frenata di emergenza) prima dell'urto.



Figura 2.29 - Collegamento dell'elastico alla puleggia.



Figura 2.30 – Prova effettuata con precompressione forche anteriori.



### 2.4.2.1 Analisi delle prove condotte

In totale sono stati svolti 18 crash test contro barriera rigida indeformabile utilizzando sia motocicli che scooter (tabella 2.3). Le velocità di lancio sono state fatte variare nel range 15-80km/h. In 7 di queste prove è stata utilizzata la barriera metallica strumentata con le celle estensimetriche per le altre 11 no.

Tabella 2.3 - Crash test tra motoveicoli e barriera rigida condotti.

ID	Marca	Modello	Peso (kg)	$\Delta p$ (m)	EES (m/s)	Barriera strumentata
1	Aprilia	RS 125	107	/	7,9	si
2	Aprilia	Scarabeo 125	149	0,080	5,3	si
3	Aprilia	Scarabeo 125	152	0,065	4,2	si
4	Aprilia	Scarabeo 200	148	0,125	6,7	si
5	Aprilia	Mana 850	213	0,170	7,8	si
6	Aprilia	Scarabeo 500	178	0,170	9,0	si
7	Aprilia	Pegaso 650	186	0,260	13,8	si
8	Aprilia	Leonardo	135	0,330	15,0	no
9	Honda	CB 500	187	0,380	16,3	no
10	Piaggio	Beverly 250	153	0,210	11,5	no
11	Suzuki	SV 650	188	0,300	14,8	no
12	Suzuki	GN 250	137	0,330	16,2	no
13	Suzuki	RMZ 250	111	0,410	22,5	no
14	Honda	Transalp 600	186	0,460	20,5	no
15	Yamaha	Majesty 250	160	0,390	18,0	no

ID	Marca	Modello	Peso (kg)	$\Delta p$ (m)	EES (m/s)	Barriera strumentata
16	Yamaha	YBR 250	144	0,430	19,4	no
17	Honda	Transalp 600	184	0,400	20,0	no
18	Honda	Rabel 250	145	0,450	23,1	no

La prova identificata col numero 1 è stata scartata in quanto il veicolo testato ha riportato la rottura del canotto di sterzo, come si può notare in figura 2.31. A causa di questo cedimento la misura dell'accorciamento del passo non è stata valutabile, in quanto tutto il blocco forcella sterzo era in grado di muoversi liberamente e non è stato possibile individuare una posizione di riferimento per la misura effettiva del passo, in seguito all'urto.



Figura 2.31 - Cedimento del canotto di sterzo in seguito all'impatto e posizione dell'accelerometro.

Per ciascuna prova l'accorciamento del passo è stato rilevato mediante misure effettuate prima e dopo le prove su ciascun veicolo testato.

L'accorciamento del passo della moto avviene a causa della formazione di una o più cerniere plastiche in corrispondenza dei punti più deboli e maggiormente sollecitati della forca o del telaio, ovvero a causa di una deformazione concentrata in singoli punti piuttosto che per una flessione plastica distribuita. Nel caso degli scooter, la cerniera si forma in prossimità del canotto di sterzo, dove il tubolare della forca si divide nei due steli. Nel caso delle moto, si formano due cerniere sui due steli della forca in prossimità della piastra di sterzo e/o una cerniera in corrispondenza dell'attacco del canotto al telaio.

Nei test condotti con la barriera strumentata è stato possibile tracciare, per ciascuna cella estensimetrica, l'andamento della forza in funzione del tempo e valutare il carico massimo sommando i singoli contributi (figure 2.32-2.35)

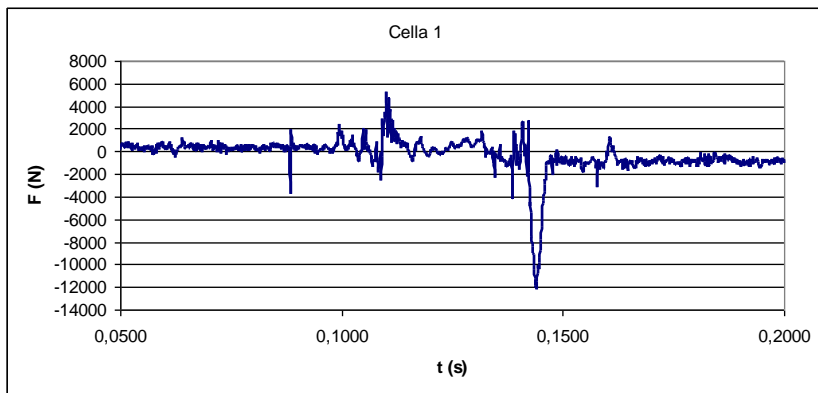


Figura 2.32 - Dettaglio della forza relativo alla cella 1.

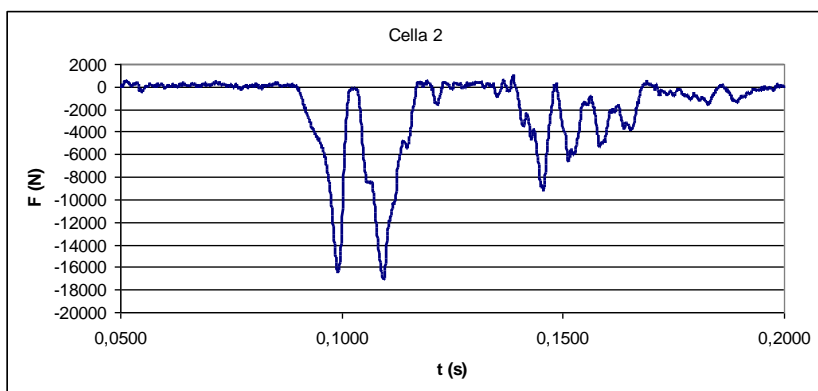


Figura 2.33 - Dettaglio della forza relativo alla cella 2.

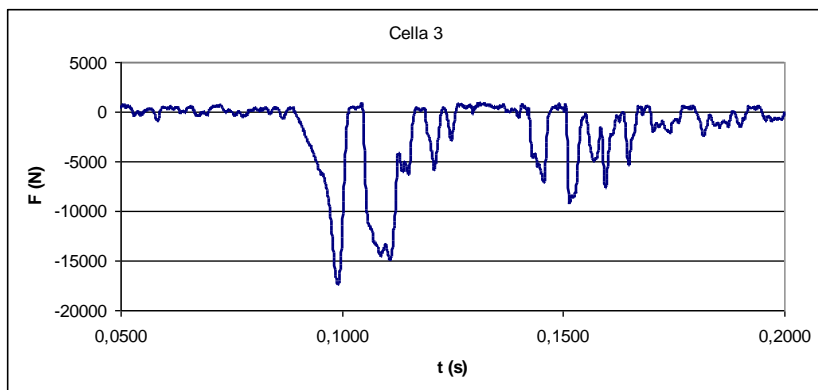


Figura 2.34 - Dettaglio della forza relativo alla cella 3.

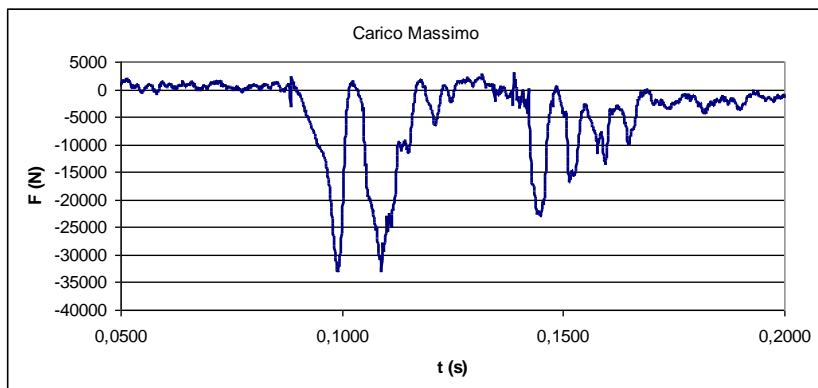


Figura 2.35 - Carico massimo ottenuto dalla somma dei valori relativi alle tre celle di carico.

L'analisi dei filmati ad alta velocità ha messo in luce i movimenti del veicolo a due ruote durante l'impatto. Nella maggior parte delle prove, dopo il primo contatto ruota-barriera, si concretizzano temporalmente le seguenti fasi:

- la deformazione delle forche anteriori fino al contatto tra la parte posteriore della ruota ed il blocco motore (tale fase può avere ampiezza diversa a seconda che il cerchio rimanga integro oppure no);
- la rotazione del mezzo a due ruote intorno al punto di contatto ruota-barriera;
- il contatto tra la zona superiore del veicolo a due ruote e la barriera.

Questo comportamento viene evidenziato anche dalla lettura dei grafici forza-tempo derivanti dall'acquisizione delle celle di carico. In particolare si può osservare in figura 2.36 che dopo il primo picco di forza (A), generato dal primo contatto ruota-barriera e rilevato da entrambe le celle posizionate sulla parte bassa della barriera, si susseguono temporalmente: un secondo picco (B), rilevato dalle celle in basso, che corrisponde al momento in cui la parte posteriore del cerchione entra in contatto con il blocco motore; ed un terzo picco (C), rilevato dalla cella di carico posta in alto sulla barriera, generato dal contatto tra la zona superiore del veicolo e la barriera strumentata.

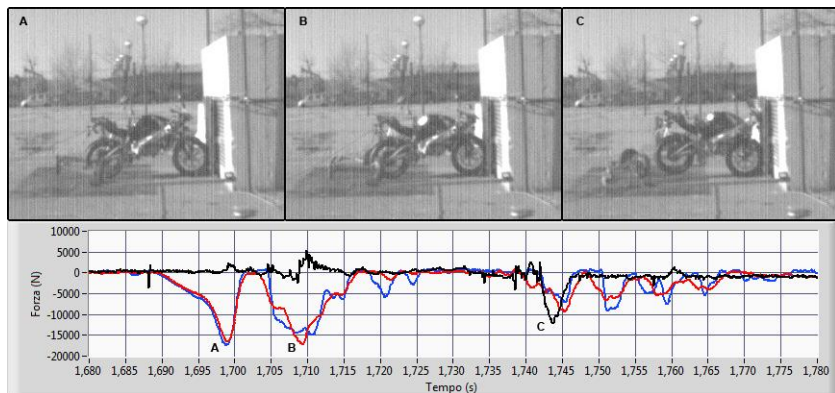


Figura 2.36 - Andamento della forza in funzione del tempo rilevato dalle tre celle di carico poste sulla barriera strumentata. Le curve rossa e blu si riferiscono alle celle posizionate nella parte bassa della barriera, mentre la curva nera è il segnale derivante dalla cella in alto.

I dati ottenuti dagli accelerometri non sono stati ritenuti compatibili con le prove eseguite; si nota infatti, dall'analisi dei loro grafici, un andamento di tipo oscillatorio peraltro non congruente con i dati forniti dalla barriera e dai filmati. Si notano inoltre, in alcune delle prove, elevate componenti positive di accelerazione, caratteristica che non può assolutamente essere associata al comportamento reale del motoveicolo.

In figura 2.37 i valori degli accorciamenti del passo in funzione dell'EES delle prove condotte sono stati riportati assieme ai dati tratti da letteratura, precedentemente scremati. Come si può osservare si distinguono due zone ben distinte: la prima per  $\Delta p$  minori di circa 0,4m e la seconda per  $\Delta p$  maggiori di 0,4m. I risultati delle prove confermano l'andamento lineare della relazione tra l'accorciamento del passo ed EES, nel campo degli accorciamenti inferiori a 0,4m, la cui retta di migliore approssimazione è:

$$EES = b_0 + b_1 \cdot \Delta p = 2,91 + 37,19\Delta p \quad (2.60)$$

con coefficiente di correlazione  $R^2$  pari a 0,96 e una deviazione standard pari a 0,75 m/s.

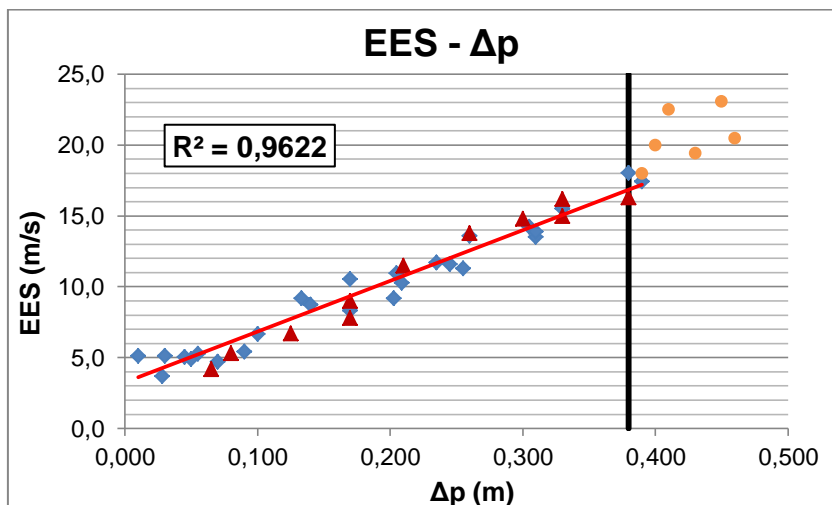


Figura 2.37 - Correlazione sperimentale tra accorciamento del passo e EES ottenuto attraverso crash test contro barriera rigida. In blu i dati di letteratura, in rosso e in giallo quelli delle prove condotte.

Moto e scooter seguono lo stesso andamento e la relazione tra accorciamento del passo e EES appare indipendente dalla massa del veicolo.

Qualitativamente non si osserva una influenza dell'escursione delle forche nella correlazione tra accorciamento del passo ed EES. Dall'analisi dei filmati ad alta velocità si nota che durante la collisione, anche nei casi in cui la forza non è stata precompressa volontariamente, si verifica ugualmente una compressione pressoché totale della sospensione anteriore prima che la stessa inizi a deformarsi plasticamente. Quindi negli incidenti reali, sia che la moto sia già in frenata o meno prima dell'impatto la deformazione delle forche inizia quando le sospensioni sono già almeno in buona parte compresse.

Indipendentemente dall'escursione delle forche, la variazione di energia cinetica del veicolo, uguale al lavoro delle forze esterne, è pari al lavoro interno svolto dalle tensioni e deformazioni nella cerniera plastica e quindi, a parità di EES, si ha un uguale angolo di rotazione della forza attorno alla cerniera. L'accorciamento del passo che ci si deve aspettare è quindi indipendente dalla configurazione di compressione delle forche durante l'urto.

Per accorciamenti del passo inferiori a 0,4m, ovvero nel campo in cui sussiste una linearità tra accorciamento del passo ed EES, l'equazione (2.60) stima

con maggior precisione il valore di EES rispetto alla procedura indicata da Wood [23] sopra illustrata la quale lega EES e  $\Delta p$  con una legge non perfettamente lineare determinata statisticamente.

Come è possibile osservare dalla figura 2.38, i dati stimati con la (2.60) si presentano meno dispersi rispetto alla retta a 45° la quale identifica la condizione di uguaglianza tra ascissa e ordinata. I valori di EES determinati a partire dall'equazione dell'energia specifica riportata in [23], per le prove riportate in tabella 2.4, si presentano mediamente sovrastimati con una deviazione standard pari a 1,98.

Tabella 2.4 – Prove di letteratura e condotte all'Università di Firenze con le quali è stato costruito il diagramma di figura 2.37.

	<b>Motoveicolo</b>	<b>Peso (kg)</b>	<b>EES reale(m/s)</b>	<b><math>\Delta p</math> (m)</b>
Selezione dei crash test di letteratura	PIAGGIO NRG	87,0	5,1	0,05
	PIAGGIO NRG	99,0	8,7	0,14
	PIAGGIO ZIP	69,0	5,1	0,01
	PIAGGIO ZIP	71,0	11,7	0,24
	GILERA RUNNER	87,0	4,9	0,05
	GILERA RUNNER	88,0	11,3	0,26
	GILERA RUNNER	94,0	14,3	0,31
	KYMC0, DJ 50	70,0	5,4	0,09
	KYMC0 DJ 50	69,0	17,4	0,39
	PEUGEOT BUXY	77,0	5,3	0,06
	PEUGEOT BUXY	82,0	8,3	0,17
	PEUGEOT BUXY	67,0	11,6	0,25
	PEUGEOT BUXY	80,0	13,5	0,31
	APRILLIA SR 50	96,0	5,1	0,03
	APRILLIA RALLY	80,0	11,0	0,21
	YAMAHA XS 400	169,0	13,9	0,31
	SUZUKI GSX 250	149,0	10,6	0,17
	SUZUKI GSX 250	158,0	6,7	0,10
	HONDA CB 400 N	169,0	4,7	0,07
	HONDA CB 400 N	169,0	18,1	0,38
	KAWASAKI 1000	220,0	3,7	0,03
	KAWASAKI 1000	223,0	13,6	0,26
	KAWASAKI 1000	231,0	9,2	0,13
	KAWASAKI 1000	224,0	10,3	0,21
	KAWASAKI 1000	229,0	9,2	0,20
	KAWASAKI 1000	230,0	15,5	0,33

	Motoveicolo	Peso (kg)	EES reale(m/s)	$\Delta p$ (m)
Crash test condotti	SCARABEO 125	149,3	5,3	0,08
	SCARABEO 125	152,3	4,2	0,07
	SCARABEO 200	148,6	6,7	0,13
	APRILIA MANA	213,7	7,8	0,17
	SCARABEO 500	178,0	9,0	0,17
	APRILIA PEGASO	186,0	13,8	0,26
	APRILIA LEONARDO	135,0	15,0	0,33
	HONDA CB 500	187,0	16,3	0,38
	PIAGGIO BEVERLY 250	153,0	11,5	0,21
	SUZUKI SV 650	188,0	14,8	0,30
	SUZUKI GN 250	137,0	16,2	0,33

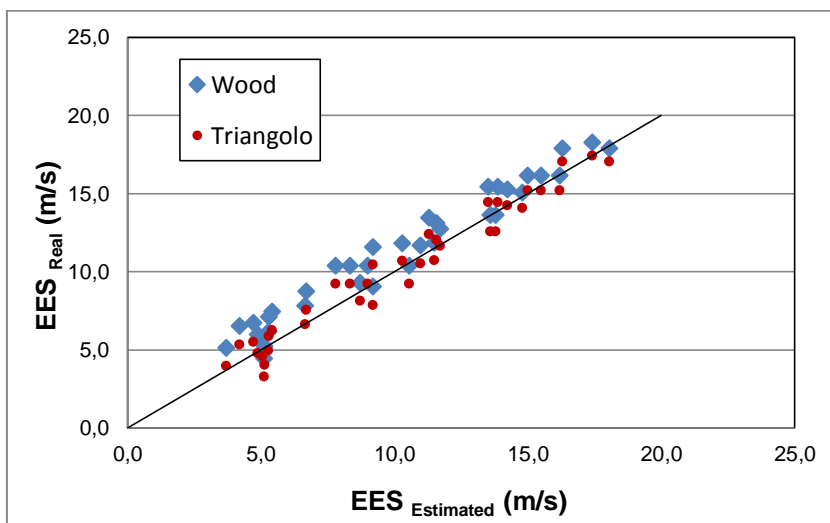


Figura 2.38 - Confronto tra l'EES reale e quello stimato con la (2.60) (punti rossi), e confronto tra l'EES reale e quello stimato con la procedura prevista da Wood [23] (punti blu).

Nella seconda zona del grafico di figura 6 rientrano le prove condotte a velocità maggiore di 65km/h; in questa area si perde la linearità tra accorciamento del passo ed EES espressa in precedenza. Dall'analisi dei filmati ad alta velocità viene messo in risalto il comportamento del mezzo durante l'urto descritto in precedenza. In particolare in queste prove è maggiormente evidente la rotazione del veicolo a due ruote ed il contatto tra la parte superiore del veicolo e la barriera rigida.



## 2.5 Energia cinetica dissipata dall'autoveicolo

Usando l'approccio classico proposto da Campbell, per determinare l'energia cinetica dissipata dall'auto, sarebbe necessario utilizzare i coefficienti di rigidità,  $A$  e  $B$ , del veicolo caratteristici della zona deformata (anteriore, posteriore o laterale). Questi sono ricavati da prove di crash contro barriera piana rigida e quindi approssimano in modo sufficientemente affidabile la relazione tra forza e deformazione quando quest'ultima è paragonabile a quella che si verifica nell'urto contro barriera, ovvero sia sostanzialmente piana e estesa su tutto il frontale, laterale o posteriore del veicolo. Questi presupposti sicuramente non si verificano nei casi in cui l'auto è coinvolta in un incidente con un motociclo. La deformazione tipica dell'auto che si riscontra in questi urti è concentrata in una particolare zona del frontale, laterale o posteriore. I coefficienti  $A$  e  $B$  risultano scarsamente rappresentativi della rigidità del veicolo per tali tipologie di incidenti.

La forma tipica del danno che si riscontra sull'auto dopo una collisione con un mezzo a due ruote è mostrata nelle figure 2.39 e 2.40.



Figura 2.39 - Danneggiamento di un'auto sulla portiera a seguito di un impatto a 90° con una moto.



Figura 2.40 - Danneggiamento di un'auto sulla parte posteriore della fiancata a seguito di un impatto a 90° con una moto.

Tale deformata dell'autoveicolo può essere approssimata con una deformazione di tipo triangolare come mostrato ad esempio nella figura 2.41.

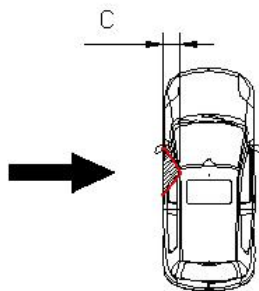


Figura 2.41 - Schematizzazione del danno sull'auto derivante da una collisione con una moto.

Per evitare di utilizzare la tecnica basata sui sei punti di misura e per tener conto anche della deformazione della moto, per la ricerca dell'energia di deformazione dell'auto, utilizziamo il metodo del Triangolo [24, 25]. Esso prevede di definire l'energia di deformazione dell'auto in funzione della forza globale che i due veicoli si scambiano e della deformazione massima  $C$ .

Per migliorare la comprensione del metodo del Triangolo rappresenteremo questo tipo di danno con lo schema molto semplificato di figura 2.42.

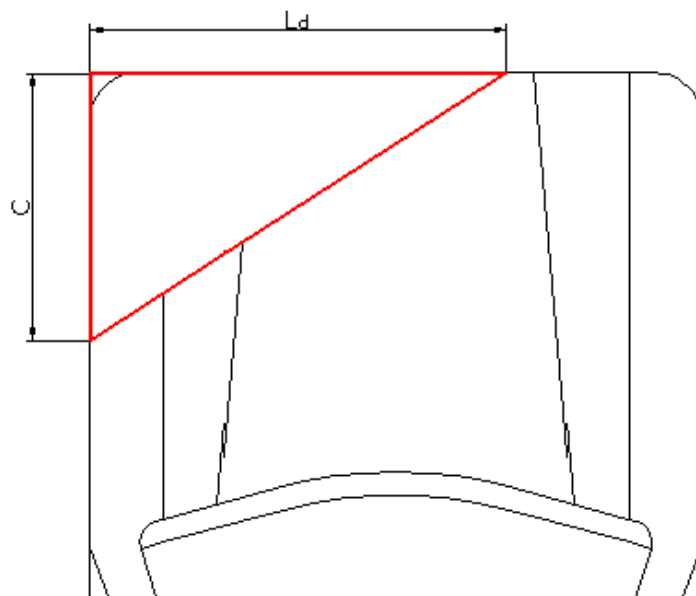


Figura 2.42 - Schema semplificato del danno triangolare.

Focalizziamo l'attenzione inizialmente sull'andamento delle forze normali al frontale del mezzo in funzione della deformazione plastica triangolare. Seguendo lo schema proposto da Campbell (linearità tra forza e deformazione), la distribuzione dei carichi sarà necessariamente del tipo mostrato in figura 2.43.

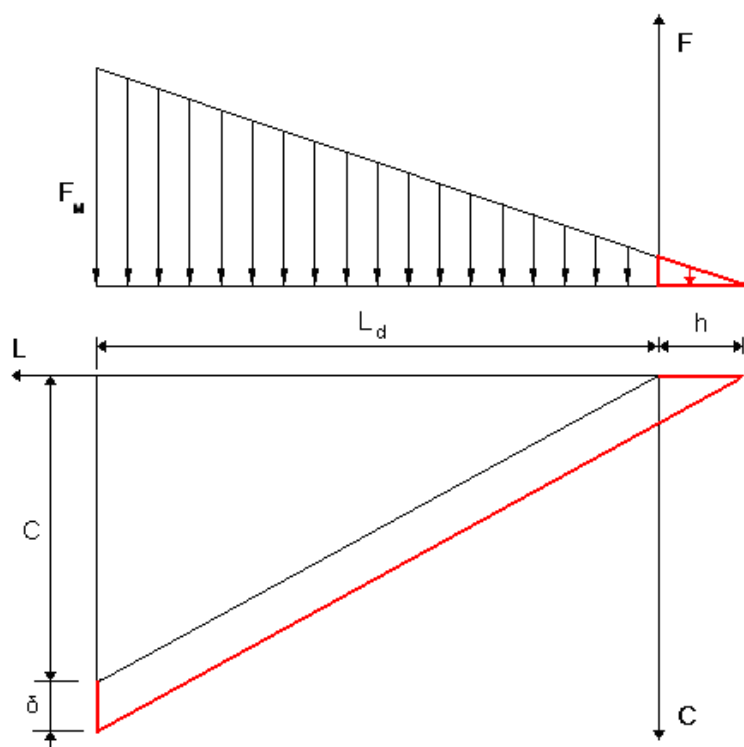


Figura 2.43 - Distribuzione dei carichi sul danno triangolare.

È un carico distribuito triangolarmente. La parte rossa fa riferimento a quell'entità del carico che genera deformazioni elastiche, deformazioni non percepibili sul veicolo danneggiato.  $\delta$  è la parte di deformazione elastica (come mostrato in figura 5) e ne parleremo più dettagliatamente in seguito.  $\delta$  e  $h$  sono messi in relazione dalla seguente proporzione:

$$h : \delta = C : L_d \quad (2.61)$$

Per il conteggio della forza risultante che i veicoli si scambiano, e quindi per determinare l'equivalente energia di deformazione, non possiamo trascurare questa frazione di carico.

La risultante associata a questo tipo di carico è:

$$F_R = \frac{1}{2} F_M (L_d + h) \quad (2.62)$$

Sfruttando la relazione (2.61):

$$F_R = \frac{1}{2} F_M \left( L_d + \frac{L_d \delta}{C} \right) = \frac{F_M L_d}{2C} (C + \delta) \quad (2.63)$$

Questa equazione altro non è che la risultante delle forze in direzione normale al veicolo che genera un danno di forma triangolare.

Partendo dalla schematizzazione di Campbell della curva  $F(C)$  forza (per unità larghezza) – deformazione:

$$F = A + BC \quad (2.64)$$

E utilizzando l'espressione per il calcolo dell'energia per unità di larghezza del veicolo:

$$e_d = \left( G + AC + \frac{BC^2}{2} \right) \quad (2.65)$$

si può ricavare, per questo tipo di forma geometrica associabile al danno, la relazione che lega l'energia dissipata alla forza risultante e alla deformazione massima.

Riferendoci allo schema di figura 2.44, ad una generica distanza  $l$  e per la deformazione  $C(l)$ , avremo:

$$e_d = \frac{1}{2} F(l) (C(l) + \delta) \quad (2.66)$$

Area sottesa dalla curva nel piano  $F$ - $C$

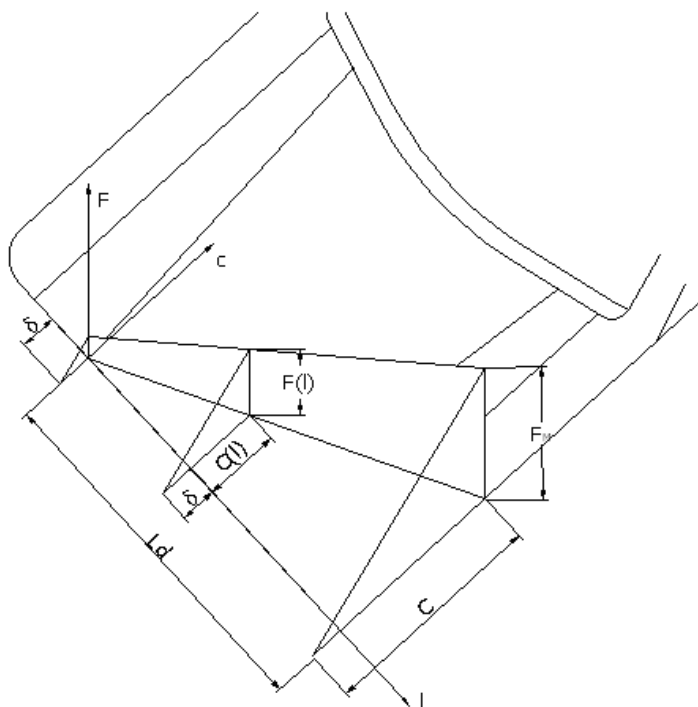


Figura 2.44 - Rappresentazione schematica dell'andamento della forza in funzione sia di  $C$  che di  $l$ .

ma:

$$F(l): (C(l) + \delta) = F_M : (C + \delta) \quad (2.67)$$

quindi

$$F(l) = F_M \frac{(C(l) + \delta)}{(C + \delta)} \quad (2.68)$$

L'equazione (2.62) può essere riscritta come:

$$e_d = \frac{1}{2} F_M \frac{(C(l) + \delta)^2}{(C + \delta)} \quad (2.69)$$

L'energia di deformazione totale può essere ricavata integrando l'equazione (2.69) tra zero e  $L_d$ , ossia nella zona del veicolo interessata all'urto:

$$E_d = \int_0^{L_d} \frac{1}{2} F_M \frac{(C(l) + \delta)^2}{(C + \delta)} dl \quad (2.70)$$

Per risolvere l'integrale è opportuno definire la generica deformazione  $C(l)$  in funzione della generica distanza  $l$ :

$$C : L_d = C(l) : l \quad (2.71)$$

$$C(l) = \frac{Cl}{L_d} \quad (2.72)$$

Procediamo con la risoluzione dell'equazione (2.70)

$$\begin{aligned} E_d &= \int_0^{L_d} \frac{1}{2} F_M \frac{\left(\frac{Cl}{L_d} + \delta\right)^2}{(C + \delta)} dl = \frac{1}{2} \frac{F_M}{(C + \delta)} \int_0^{L_d} \left(\frac{Cl}{L_d} + \delta\right)^2 dl = \\ &= \frac{1}{2} \frac{F_M}{(C + \delta)} \int_0^{L_d} \left(\left(\frac{Cl}{L_d}\right)^2 + 2\frac{Cl}{L_d}\delta + \delta^2\right) dl = \\ &= \frac{1}{2} \frac{F_M}{(C + \delta)} \left[ \frac{C^2 l^3}{3L_d^2} + 2\frac{Cl^2}{2L_d}\delta + \delta^2 l \right]_0^{L_d} = \frac{1}{2} \frac{F_M}{(C + \delta)} \left( \frac{C^2 L_d}{3} + CL_d\delta + L_d\delta^2 \right) \end{aligned} \quad (2.73)$$

L'energia di deformazione in funzione della forza per unità di lunghezza è:

$$E_d = \frac{1}{2} \frac{F_M L_d}{(C + \delta)} \left( \frac{C^2}{3} + C\delta + \delta^2 \right) \quad (2.74)$$

dove  $C$  è il danno massimo.

Esprimendo la forza per unità di lunghezza,  $F_M$ , in funzione della forza risultante,  $F_R$ , attraverso la (2.63)

$$F_M = \frac{2CF_R}{L_d(C + \delta)} \quad (2.75)$$

e sostituendola nella (2.74) otteniamo:

$$E_d = \frac{F_R C}{(C + \delta)^2} \left( \frac{C^2}{3} + C\delta + \delta^2 \right) \quad (2.76)$$

che corrisponde all'energia normale di deformazione assorbita dall'auto in deformazione triangolare. Dove  $F_R$  è la forza uguale in modulo che auto e moto si scambiano nella fase di compressione,  $C$  è la deformazione massima dell'auto e  $\delta$  è la deformazione elastica assunta costante nella zona interessata al danno.

Grazie all'introduzione del coefficiente di forma  $k$  [24 e 25] è possibile esprimere l'energia di deformazione indipendentemente dalla forma del danno con la relazione:

$$E_d = \frac{1}{2} F_R (kC + \delta) \quad (2.77)$$

Noto il valore della forza risultante, sarebbe a questo punto possibile determinare il valore di energia cinetica dissipata dall'auto; basterebbe infatti possedere la sola misura caratteristica della deformazione residua presente sull'autoveicolo.

Schematizzando il veicolo a due ruote come un sistema massa molla, come fatto per le auto, anche la forza scambiata nell'impatto avrà un andamento lineare con la deformazione subita dal motoveicolo:

$$F = A + B(\Delta P) \quad (2.78)$$

Ricordando che:

$$\begin{aligned} A &= M b_0 b_1 \\ B &= M b_1^2 \end{aligned} \quad (2.79)$$

la relazione tra la forza e l'accorciamento del passo diventa:

$$F = M(b_0 b_1 + b_1^2 \Delta P) \quad (2.80)$$

ovvero:

$$F_R = M_M(108,2 + 37,19^2 \Delta P) \quad (2.81)$$



Tale forza, che produce la flessione della foca anteriore, è allineata alla direzione longitudinale della moto, che è anche la direzione principale della forza PDOF.

La relazione esprime il valore della forza che i due veicoli si scambiano reciprocamente. Conoscendo quindi il valore dell'accorciamento del passo del veicolo a due ruote è possibile determinare sia l'energia dissipata sia la forza che scambia con l'auto, e di conseguenza, applicando la 2.77, l'energia dissipata dall'auto nell'urto:

$$E_{d,A} = \frac{1}{2} M_M (b_0 b_1 + b_1^2 \Delta p) (kC + \delta) \quad (2.82)$$

La lettura delle celle di carico estensimetriche ed in particolare i valori massimi di forza ottenuti nei crash test citati nel paragrafo precedente, confermano la buona stima dei coefficienti  $b_0$  e  $b_1$  definiti nella relazione 2.60 e di conseguenza la buona stima della forza scambiata nell'urto attraverso la relazione 2.80. Nella tabella 2.5 si riportano per le 7 prove in cui è stata utilizzata la barriera strumentata sia i valori di forza ottenuti dalle celle di carico che quelli calcolati con la relazione 2.80. Dal confronto si osserva un errore assoluto massimo di 4kN ed un errore percentuale inferiore all'8%, congruenti con le approssimazioni generalmente fatte durante l'analisi dell'urto di un veicolo e con la dispersione dei dati negli urti contro barriera sopra mostrati.

Tabella 2.5 – Prove condotte tra moto e barriera con l'ausilio della barriera strumentata.

ID	$\Delta p$ (cm)	Forza da Celle (N)	Forza da Regressione (N)	Errore (N)	Errore %
1	Non misurabile	33500	/	/	/
2	8	31500	35081	-1177	-3,7
3	6,5	28700	32530	-1474	-5,1
4	12,4	45500	44450	3727	8,2
5	17	Non acquisita	80968	/	/
6	17	57000	64803	-4116	-7,2
7	26	89300	91638	2284	2,6

### 2.5.1 Correzione dell'energia cinetica dissipata dall'autoveicolo

L'equazione (2.82) esprime l'energia di deformazione dissipata dall'autoveicolo nel caso in cui la deformazione, tipicamente di forma triangolare, si limita, in termini di altezza, ad una quota da terra paragonabile a quella del

cerchione della moto. Nei casi in cui l'introflessione sull'auto si propaga al di sopra di tale quota, a causa della geometria dei veicoli e/o a causa dell'elevata velocità di impatto che genera una rotazione del motoveicolo, l'energia cinetica dissipata dall'auto non è totalmente imputabile alla sola flessione delle forche anteriori. In questi casi la relazione (2.82) fornirà un valore sottostimato di energia cinetica dissipata dall'autoveicolo.

Dall'analisi dei crash test svolti e quelli di letteratura tecnica [20, 26] è stato verificato che nei casi in cui le deformazioni sull'autoveicolo si estendono al di sopra della quota del cerchione con una introflessione paragonabile a quella presente nella sua zona inferiore, è possibile supporre che l'energia dissipata dall'autoveicolo sia circa il doppio rispetto a quella stimata con la (2.82).

## 2.6 Validazione mediante prove sperimentali

Nei paragrafi precedenti è stato presentato un modello semi-empirico per valutare l'energia cinetica dissipata globalmente in un impatto tra moto e auto. Al fine di validare le relazioni trovate per la valutazione dell'energia dissipata sia dal mezzo a due ruote che dall'auto, è stata condotta una campagna di prove sperimentali nella quale sono stati riprodotti impatti tra autoveicolo e motociclo senza manichino a bordo. Tutte le prove sono state eseguite con l'autoveicolo inizialmente fermo e fissato in modo tale da rendere nullo il suo moto post-urto. Al mezzo a due ruote è stato imposto il moto adottando lo stesso metodo utilizzato per le prove contro barriera rigida (figura 2.45). Le prove sono state condotte su scooter e moto a diverse velocità di impatto e colpendo l'auto in diversi target: portiera, fianchetto anteriore, zona frontale. Sul mezzo a due ruote sono stati incollati due marker a distanza nota in modo da poter stimare la velocità post urto dal filmato ad alta velocità acquisito con la telecamera Fastec InLine (250f/s di acquisizione per 8,8s). La strumentazione impiegata per rilevare la velocità del mezzo a due ruote all'impatto è la stessa utilizzata nelle prove contro barriera rigida: sistema di fotocellule illuminate da laser (risoluzione di 0,1km/h), un sistema radar (Radar Stalker Pro: SpeedRange 1-480km/h, Accuracy  $\pm 1,6$ km/h).



Figura 2.45 – Metodo impiegato per lanciare il motoveicolo.

Prima di ciascun crash test i motoveicoli sono stati pesati e ne è stato misurato il passo. Al termine della prova è stato determinare l'accorciamento del passo, effettuando una doppia misura da ambo i lati del mezzo, ed è stata misurata la massima introflessione presente sull'autoveicolo.

In totale sono state condotte 6 prove nel range di velocità tra 30 e 50km/h, in tabella 2.6 vengono riportati i dati delle prove sperimentali svolte.

Tabella 2.6 – Prove condotte tra auto e moto senza dummy.

ID	Auto	Punto di impatto	Motoveicolo	Peso (kg)	V (m/s)
1	SAAB 9-3 Cabrio	Portiera dx	Yamaha XJ 750	230	8,3
2	SAAB 9-3 Cabrio	Portiera dx	Honda Rebel 450	177	11,4
3	SAAB 9-3 Cabrio	Portiera dx	Kawasaki GPZ 550	155	13,2
4	SAAB 9-3 Cabrio	Portiera sx	Suzuki GM 125	110	14,4
5	Fiat Punto	Fianchetto sx	Peugeot Looxor	101	13,8
6	Fiat Punto	Frontale	TGIB Laser	95	13,5

### 2.6.1 Prova auto-moto senza motociclista

#### **PROVA ID 1**

La prima prova è stata svolta su uno motocicletto Yamaha XJ 750 (figura 2.46), la velocità di impatto rilevata tramite le fotocellule e la telecamera ad alta velocità è di 30,0km/h. La moto ha mantenuto il suo assetto verticale fino al momento dell'impatto, colpendo l'autoveicolo nella parte centrale della portiera destra (figura 2.47).

Tabella 2.7 – Dati relativi alla prova ID 1.

Tipo di prova	Crash test tra moto e auto
Motoveicolo	Yamaha XJ 750
Autoveicolo	Saab 9.3 cabrio
Massa motoveicolo	230 kg
Velocità di impatto	30,0 km/h
Velocità di uscita motoveicolo	8,0 km/h
Passo motoveicolo	144 cm
Accorciamento passo ( $\Delta p$ )	12 cm
Introflessione autoveicolo (C)	4 cm



Figura 2.46 – Veicoli impiegati nella prova ID 1.



Figura 2.47 – Introflessione sull'autoveicolo nella prova ID 1.

Dall'analisi del filmato ad alta velocità, si può notare la compressione della forcella anteriore nell'istante in cui la ruota va a contatto con l'auto; si nota che questa fase è comunque accompagnata da una componente, anche se lieve, di deformazione. Subito dopo questa fase di compressione inizia la deformazione della forcella anteriore. In questo urto non si evidenziano contatti importanti tra la parte superiore del veicolo a due ruote e l'auto.

Il passo originale del motoveicolo era di 144cm, dopo la prova la misura rilevata è stata di 132cm, si misura quindi un accorciamento del passo pari a 12cm. La parte anteriore del veicolo è risultata integra in seguito all'urto (figura 2.48), non si riscontrano infatti danni evidenti al cerchio o allo pneumatico, si può notare soltanto la deformazione del parafango anteriore, informazione del tutto irrilevante ai fini dell'indagine sul comportamento strutturale del mezzo.



Figura 2.48 – Motoveicolo della prova ID 1 dopo l'urto.

## **PROVA ID 2**

La seconda prova è stata svolta su uno motociclo Honda Rebel 450 (figura 2.49), la velocità di impatto rilevata tramite le fotocellule e la telecamera ad alta velocità è di 41,0km/h. La moto ha mantenuto il suo assetto verticale fino al momento dell'impatto, colpendo l'autoveicolo nella parte anteriore della portiera destra (figura 2.50).

Tabella 2.8 – Dati relativi alla prova ID 2.

Tipo di prova	Crash test tra moto e auto
Motoveicolo	Honda Rebel 450
Autoveicolo	Saab 9.3 cabrio
Massa motoveicolo	177 kg
Velocità di impatto	41,0 km/h
Velocità di uscita motoveicolo	8,0 km/h
Passo motoveicolo	153 cm
Accorciamento passo ( $\Delta p$ )	20 cm
Introflessione autoveicolo (C)	6 cm





Figura 2.49 - Veicoli impiegati nella prova ID 2.

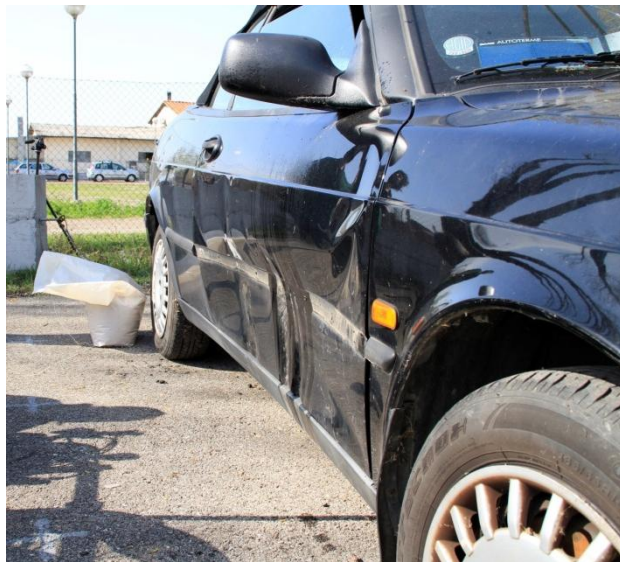


Figura 2.50 - Introflessione sull'autoveicolo nella prova ID 2.

Anche in questo caso si nota la compressione della forcella anteriore nell'istante in cui la ruota va a contatto con l'auto e la successiva deformazione plastica della forcella. In questo urto non si evidenziano contatti importanti tra la parte superiore del veicolo a due ruote e l'auto.

Il passo originale del motoveicolo era di 153cm, dopo la prova la misura rilevata è stata di 133cm, si misura quindi un accorciamento del passo pari a 20cm. La parte anteriore del veicolo è risultata integra in seguito all'urto (figura 2.51) a meno di una deformazione plastica del cerchione e ovviamente delle forche.



Figura 2.51 - Motoveicolo della prova ID 2 dopo l'urto.

### **PROVA ID 3**

La terza prova è stata svolta su uno motociclo Kawasaki GPZ 550 (figura 2.52), la velocità di impatto rilevata tramite le fotocellule e la telecamera ad alta velocità è di 41,0km/h. La moto ha mantenuto il suo assetto verticale fino al momento dell'impatto, colpendo l'autoveicolo nella parte centrale della portiera destra.

Tabella 2.9 – Dati relativi alla prova ID 3.

Tipo di prova	Crash test tra moto e auto
Motoveicolo	Kawasaki GPZ 550
Autoveicolo	Saab 9.3 cabrio
Massa motoveicolo	155 kg
Velocità di impatto	47,5 km/h
Velocità di uscita motoveicolo	15,1 km/h
Passo motoveicolo	145 cm
Accorciamento passo ( $\Delta p$ )	22 cm
Introflessione autoveicolo (C)	8 cm





Figura 2.52 - Veicoli impiegati nella prova ID 3.

Anche in questo caso si nota la compressione della forcella anteriore nell'istante in cui la ruota va a contatto con l'auto e la successiva deformazione plastica della forcella. In questo urto non si evidenziano contatti importanti tra la parte superiore del veicolo a due ruote e l'auto.

Il passo originale del motoveicolo era di 145cm, dopo la prova la misura rilevata è stata di 123cm, si misura quindi un accorciamento del passo pari a 20cm. Nella parte anteriore del veicolo si riscontra la flessione delle forche, la deformazione plastica del cerchione e la rottura dello stesso (figura 2.53).



Figura 2.53 - Motoveicolo della prova ID 3 dopo l'urto.

### **PROVA ID 4**

La quarta prova è stata svolta su uno motocicletto Suzuki GM 125, la velocità di impatto rilevata tramite le fotocellule e la telecamera ad alta velocità è di 52,0km/h. La moto ha mantenuto il suo assetto verticale fino al momento dell'impatto, colpendo l'autoveicolo nella parte posteriore della portiera sinistra.

Tabella 2.10 – Dati relativi alla prova ID 4.

Tipo di prova	Crash test tra moto e auto
Motoveicolo	Suzuki GM 125
Autoveicolo	Saab 9.3 cabrio
Massa motoveicolo	110 kg
Velocità di impatto	52 km/h
Velocità di uscita motoveicolo	11 km/h
Passo motoveicolo	128,5 cm
Accorciamento passo ( $\Delta p$ )	21 cm
Introflessione autoveicolo (C)	10 cm



Figura 2.54 - Veicoli impiegati nella prova ID 4.

Anche in questo caso si nota la compressione della forcella anteriore nell'istante in cui la ruota va a contatto con l'auto e la successiva deformazione plastica della forcella. A differenza degli urti precedenti, si evidenzia un contatto tra la parte superiore del veicolo a due ruote e l'auto tanto da deformare l'autoveicolo a una quota superiore a quella del cerchione della moto (figura 2.55) fino alla maniglia.



Figura 2.55 - Introflessione sull'autoveicolo nella prova ID 4.

Il passo originale del motoveicolo era di 128,5cm, dopo la prova la misura rilevata è stata di 107,5cm, si misura quindi un accorciamento del passo pari a 21cm.

Nella parte anteriore del veicolo si riscontra la flessione delle forche, la deformazione plastica e la rottura del cerchione, la deformazione del parafango anteriore e la rottura del gruppo ottico (figura 2.56).



Figura 2.56 - Motoveicolo della prova ID 4 dopo l'urto.

### **PROVA ID 5**

La quinta prova è stata svolta su uno scooter Peugeot Looxor (figura 2.57), la velocità di impatto rilevata tramite le fotocellule e la telecamera ad alta velocità è di 50,0km/h. La moto ha mantenuto il suo assetto verticale fino al momento dell'impatto, colpendo l'autoveicolo nel fianchetto anteriore sinistro.

Tabella 2.11 – Dati relativi alla prova ID 5.

Tipo di prova	Crash test tra moto e auto
Motoveicolo	Peugeot Looxor
Autoveicolo	Fiat Punto
Massa motoveicolo	111 kg
Velocità di impatto	50 km/h
Velocità di uscita motoveicolo	0 km/h
Passo motoveicolo	131,5 cm
Accorciamento passo ( $\Delta p$ )	21 cm
Introflessione autoveicolo (C)	25 cm



Figura 2.57 - Veicoli impiegati nella prova ID 5.

In questo urto non si evidenziano contatti importanti tra la parte superiore del veicolo a due ruote e l'auto.

Il passo originale del motoveicolo era di 131,5cm, dopo la prova la misura rilevata è stata di 110,5cm, si misura quindi un accorciamento del passo pari a 21cm. Nella parte anteriore del veicolo si riscontra sostanzialmente la sola flessione delle forche.

### **PROVA ID 6**

La sesta prova è stata svolta su uno scooter TGIB Laser (figura 2.58), la velocità di impatto rilevata tramite le fotocellule e la telecamera ad alta velocità è



di 48,5km/h. La moto ha mantenuto il suo assetto verticale fino al momento dell'impatto, colpendo l'autoveicolo nella parte posteriore della portiera sinistra.

Tabella 2.12 – Dati relativi alla prova ID 6.

Tipo di prova	Crash test tra moto e auto
Motoveicolo	TGIB Laser
Autoveicolo	Fiat Punto
Massa motoveicolo	95 kg
Velocità di impatto	48,5 km/h
Velocità di uscita motoveicolo	8,6 km/h
Passo motoveicolo	125 cm
Accorciamento passo ( $\Delta p$ )	14 cm
Introflessione autoveicolo (C)	20 cm



Figura 2.58 - Veicoli impiegati nella prova ID 6.

Anche in questo caso si nota la compressione della forcella anteriore nell'istante in cui la ruota va a contatto con la barriera e la successiva deformazione plastica della forcella. Come nella prova numero 4, si evidenzia un contatto tra la parte superiore del veicolo a due ruote e l'auto tanto da deformare e danneggiare vistosamente la parte alta del veicolo a due ruote così come riportato in figura 2.59.

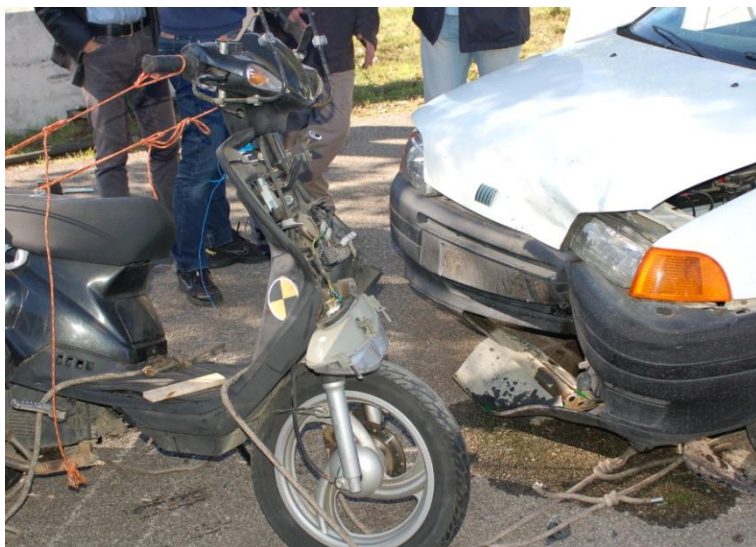


Figura 2.59 – Veicoli della prova ID 6 dopo l’urto.

Il passo originale del motoveicolo era di 125cm, dopo la prova la misura rilevata è stata di 111cm, si misura quindi un accorciamento del passo pari a 14cm.

## 2.6.2 Risultati delle prove

Ricapitolando, per le 6 prove sperimentali condotte sono stati riprodotti impatti tra moto e auto nel range di velocità compreso tra i 30 e i 50km/h. Per ciascuna prova è stata misurata l’entità della deformazione presente sul motociclo ( $\Delta p$ ) e sull’autovettura (C). Grazie alla strumentazione utilizzata, ed in particolare alla telecamera ad alta velocità, è stato possibile stimare la velocità di uscita dall’urto del mezzo a due ruote. Per semplicità di studio si ricorda che all’auto, inizialmente ferma, è stato impedito qualsiasi movimento a seguito dell’urto. Nella tabella 2.13 vengono riportati per ciascuna prova i valori delle velocità pre e post urto e i valori di deformazioni della moto e dalle auto intesi rispettivamente come accorciamento del passo e introflessione.

Tabella 2.13 – Riepilogo delle prove sperimentali condotte tra auto e moto senza motociclista.

ID	V <sub>i</sub> (m/s)	V <sub>f</sub> (m/s)	Δp (m)	C (m)
1	8,3	2,2	0,12	0,040
2	11,4	2,2	0,200	0,060
3	13,2	4,2	0,220	0,080
4	14,4	3,1	0,205	0,100
5	13,8	0	0,210	0,250
6	13,5	2,4	0,140	0,200

Attraverso l'equazione della conservazione della quantità di moto è stato possibile quantificare esattamente per ciascun test il valore di energia cinetica globalmente dissipata in deformazione dal sistema auto-moto.

$$\frac{1}{2}m_i V_i^2 = \frac{1}{2}m_f V_f^2 + E_{d,M} \quad (2.83)$$

In tabella 2.14 vengono riportati i valori di energia cinetica dissipata per i 6 crash test sopra descritti.

Tabella 2.14 – Energia cinetica dissipata nei test condotti.

ID	V <sub>i</sub> (m/s)	V <sub>f</sub> (m/s)	Δp (m)	C (m)	E <sub>d,M</sub> (kJ)
1	8,3	2,2	0,120	0,040	7,7
2	11,4	2,2	0,200	0,060	11,7
3	13,2	4,2	0,220	0,080	13,0
4	14,4	3,1	0,205	0,100	12,0
5	13,8	0	0,210	0,250	10,7
6	13,5	2,4	0,140	0,200	9,2

Applicando le equazioni (2.57) (con EES stimato attraverso la relazione (2.60)) e (2.82), è possibile ricavare una stima dell'energia cinetica dissipata nell'urto. Solo nei test 4 e 6, si riscontrano differenze più elevate rispetto al valore di energia cinetica realmente dissipata dai due veicoli (tabella 2.15).

Tabella 2.15 – Confronto tra l'energia realmente dissipata ( $E_d$ ) e quella stimata.

ID	$E_{d,M}$ (kJ)	$E_{d,M}$ stimata (kJ)
1	7,7	8,5
2	11,7	12,6
3	13,0	12,9
4	12,0	8,8
5	10,7	10,3
6	9,2	6,4

Nei due test citati si evidenziano sull'autoveicolo, come già precedentemente descritto, deformazioni che si estendano ben al di sopra dell'altezza del cerchione anteriore del mezzo a due ruote. In queste prove, come visto per alcuni dei test contro barriera rigida, si genera una rotazione del motoveicolo e il contatto con l'auto anche con la parte superiore. In questi casi l'energia cinetica dissipata dall'auto non è imputabile solo alla flessione delle forche anteriori. L'equazione (2.82) esprime l'energia di deformazione dissipata dall'autoveicolo nel caso in cui la deformazione, tipicamente di forma triangolare, si limita, in termini di altezza, ad una quota da terra paragonabile a quella del cerchione della moto. La relazione (2.82) fornirà dunque un valore sottostimato di energia cinetica dissipata dall'autoveicolo qualora la deformazione sul veicolo interessi anche quote maggiori.

Essendo la deformazione sull'auto pressoché uniforme, come profondità, a qualsiasi quota da terra, è possibile, come visto prima, supporre che l'effettiva energia dissipata dal mezzo sia circa il doppio rispetto a quella che viene valutata con la (2.82).

Correggendo l'energia di deformazione dissipata dall'autoveicolo nei test ID 4 e ID 6, si osserva che i valori di energia trovati applicando il modello semi-empirico sviluppato si discostano poco dal valore di energia cinetica effettivamente dissipata dai due veicoli: l'errore assoluto non supera i 900J mentre l'errore relativo è inferiore al 10%. Tali errori risultano generalmente accettabili per la ricostruzione dell'incidente, in quanto producono variazioni sulle velocità relative tra i veicoli inferiori a 1m/s del tutto paragonabili a quelle prodotte dalle incertezze tipicamente presenti sui dati di ingresso.

Nella fattispecie, le differenze riscontrate possono verosimilmente essere imputate sia all'intrinseca dispersione dei dati sperimentali che mettono in relazione il valore di EES con l'accorciamento del passo della moto, sia al fatto che in tutti i casi non viene considerata l'energia legata alla rottura o deformazioni dei componenti presenti nella parte frontale del motoveicolo come ad esempio lo scudo, il parafango, il cupolino e la strumentazione.



Tabella 2.16 – Errore assoluto e percentuale commesso nella stima dell'energia cinetica dissipata.

ID	$E_{d,M}$ (kJ)	$E_{d,M}$ stimata (kJ)	Errore (kJ)	Errore %
1	7,7	8,5	807	6,7
2	11,7	12,6	-17	0,1
3	13,0	12,9	-874	7,5
4	12,0	11,2	-722	9,3
5	10,7	10,3	403	3,8
6	9,2	9,5	-239	2,6



## **3 Fase pre-urto**

### **3.1 Analisi della fase pre-urto**

Nonostante la varietà di tipi di urti con i mezzi a due ruote (vedi figura 3.1), si possono sempre individuare nell'incidente, come già anticipato precedentemente, le fasi pre-urto, urto e post urto, e studiare le singole fasi separatamente.

Nella fase pre-urto, generalmente si devono tenere in conto gli aspetti della dinamica di guida della moto, se questa era in condizioni stabili o instabili e le manovre del guidatore.

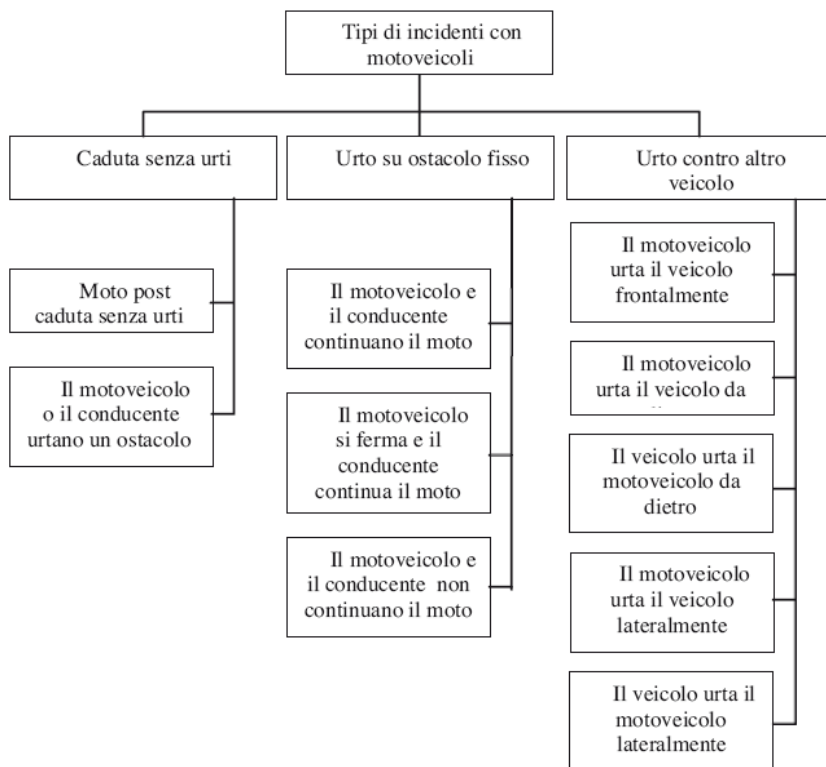


Figura 3.1 - Schema delle tipologie di incidenti che coinvolgono i mezzi a due ruote.

Nella ricostruzione di un incidente con mezzi a due ruote, si possono considerare alcune osservazioni svolte a partire dall'analisi di numerosi incidenti e crash tests:

- Il bloccaggio della ruota posteriore generalmente produce una lunga traccia a forma di S allungata; durante tale strisciata è possibile mantenere la stabilità direzionale;
- Il bloccaggio della ruota anteriore produce generalmente una traccia rettilinea di lunghezza modesta, dato che tipicamente alla fine della traccia si ha la perdita della stabilità del veicolo che cade a terra;
- Nel caso di freni a disco senza fori, se sono utilizzati in condizioni di pioggia, l'effetto frenante inizia con un certo ritardo, fino a che il film di acqua presente sul disco non viene rimosso;
- I guidatori inesperti generalmente tendono, nelle situazioni di emergenza, a frenare solo col freno posteriore; la decelerazione

maggiore si ottiene bloccando la ruota posteriore e frenando quella anteriore in modo da non arrivare al bloccaggio;

- Un guidatore può evitare un urto frenando, evitando l'ostacolo, mandando la moto a terra e spingendosi lontano da essa;
- In condizioni di strada bagnata, una scivolata in curva avviene tipicamente con la ruota anteriore; in tali condizioni il guidatore cade davanti al manubrio e scivola davanti alla moto;
- Viceversa, in condizioni di strada asciutta, è più probabile che scivoli la ruota posteriore, in tal caso il guidatore rimane dietro la moto, che prosegue lungo la tangente alla curva;
- Su strada con ghiaia, sabbia, olio o sporco, inizia a scivolare è quella che prima viene in contatto con tali elementi;
- Quando la moto cade sul fianco le prime parti che urtano col terreno sono tipicamente le pedane per i piedi, il manubrio, la marmitta; a seguito di tali contatti al moto può ruotare su se stessa attorno a uno di tali punti, a causa, anche, dell'eventuale contatto della ruota che ancora gira col terreno;
- Il casco può limitare la visuale e la percezione dei suoni e può ritardare le reazioni del conducente.

Nel seguito l'attenzione verrà posta esclusivamente alla stima della velocità del veicolo prima dell'urto partendo dalla conoscenza dell'energia cinetica dissipata nell'urto. In particolare sarà brevemente descritto la metodologia, già nota in letteratura, di valutazione della velocità relativa non considerando la massa del conducente del motociclo. Successivamente verrà proposta una equazione approssimata per il calcolo della velocità relativa all'urto a partire dall'energia dissipata nelle deformazioni di moto e auto, applicabile nei casi in cui al momento dell'impatto il conducente del motoveicolo sia ancora in sella, ovvero vi sia la presenza di tre corpi distinti (moto, auto, motociclista), ciascuno caratterizzato dal proprio moto post-urto.

### 3.1.1 Velocità relativa nell'urto con 2 corpi: auto e moto

Nel caso in cui al momento dell'urto tra moto e auto non sia più presente il motociclista in sella al proprio mezzo, la velocità relativa tra i due veicoli può essere stimata applicando l'equazione vista nel capitolo 2 che la lega la  $V_R$  alle masse dei veicoli, al coefficiente di restituzione e all'energia dissipata dai due veicoli:

$$V_R = \sqrt{\frac{2E_d}{m_c(1-\varepsilon^2)}} \quad (3.1)$$

Nel caso generale, in cui si possono generare anche delle rotazioni dei mezzi l'equazione per la stima della velocità relativa diventerà:

$$V_R = \sqrt{\frac{2E_d(m_1/\gamma_2 + m_2/\gamma_1)}{m_1 m_2 (1-\varepsilon^2)}} \quad (3.2)$$

Dove  $\gamma_1$  e  $\gamma_2$  sono i fattori di riduzione delle masse:

$$\gamma = \frac{k^2}{k^2 + h^2} \quad (3.3)$$

dove con  $h$  si indica il vettore distanza tra il baricentro di ciascun veicolo e la linea di azione dell'impulso  $l$  e con  $k$  il raggio giratorio  $k^2 = J/m$ .

In [23] il calcolo della velocità relativa in urti tra auto e moto con conducente viene effettuato applicando la (3.2) e trascurando gli effetti di restituzione:  $\varepsilon=0$ .

L'equazione utilizzata in [23] oltre a non tenere di conto del coefficiente di restituzione, che può essere approssimato a zero solamente per urti ad alta velocità, caratterizzati da grandi deformazioni, non tiene di conto della dinamica del conducente nelle fasi di pre-urto e post-urto per il calcolo della velocità relativa.

### 3.1.2 Velocità relativa nell'urto con 3 corpi: auto, moto e motociclista

L'utilizzo dei modelli impulsivi (conservazione della quantità di moto) per ricostruire la fase d'urto di un incidente tra un qualsivoglia mezzo a due ruote con il proprio conducente e un autoveicolo è generalmente affetto da elevata sensibilità ai dati di input; in altre parole con l'adozione della conservazione della quantità di moto per piccole variazioni dei dati di input corrispondono elevate variazioni sugli output.

Si consideri ad esempio il crash n. 1 svolto presso l'Università di Žilina [20] nel quale è stato svolto un crash tra una moto Gilera 125 contro la parte posteriore di una Opel Rekford ferma con freno di posizionamento azionato. Si vuole ricostruire l'urto applicando i modelli impulsivi.

Riportiamo i dati dei corpi coinvolti:

- massa auto: 1100kg;
- massa moto: 120kg;
- massa manichino: 75kg;
- velocità d'impatto della moto: 44,4km/h;
- velocità post urto dell'auto: 5km/h;
- distanza longitudinale di proiezione del manichino: 3,4m;
- distanza trasversale di proiezione del manichino: 1,4m;
- distanza longitudinale di proiezione della moto: 0,7m;
- distanza trasversale di proiezione della moto: 2,5m;
- spostamento dell'auto: 0,7m.

Si riporta inoltre in figura 3.2 il rilievo topografico del crash.

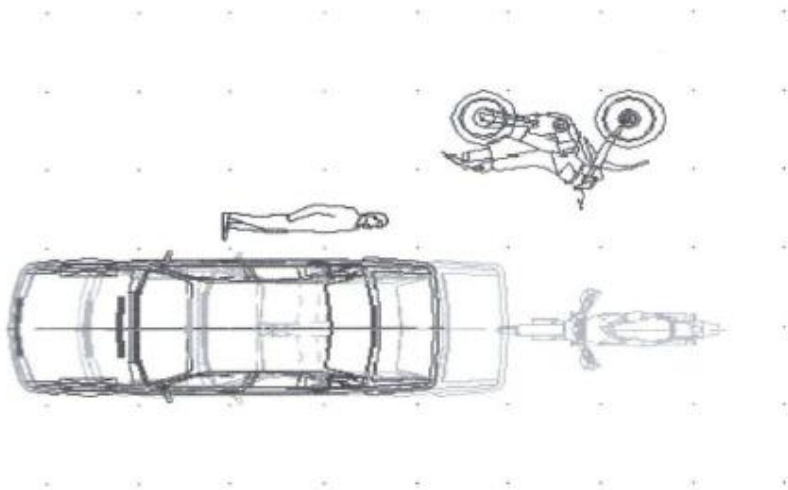


Figura 3.2 – Posizioni iniziali e finali dei 3 corpi.

Analizziamo l'urto utilizzando l'approccio classico, che parte dall'analisi della fase post urto per risalire alla fase d'urto.

L'autoveicolo ha percorso 0,7m; assumendo un drag factor  $d_f=0,2g$  considerando l'azionamento del freno a mano. In questo modo si ottiene una velocità post urto dell'auto di:

$$\overline{V_{Ax}} = \sqrt{2d_f g x} = \sqrt{2 \cdot 0,2 \cdot 9,81 \cdot 0,7} = 1,66 \text{ m/s} = 6 \text{ km/h} \quad (3.4)$$

Tale velocità è nella direzione del moto iniziale della motocicletta, che si assume come asse X. Per la valutazione della velocità post urto della moto si può

assumere un coefficiente d'attrito pari a 0,4 e una distanza percorsa totale di circa 2,6m, si ottiene:

$$\overline{V_M} = \sqrt{2d_f gx} = \sqrt{2 \cdot 0,4 \cdot 9,81 \cdot 2,6} = 4,51m/s = 16,2km/h \quad (3.5)$$

La componente nella direzione X risulta:

$$\overline{V_{M_x}} = \sqrt{2d_f gx} = \sqrt{2 \cdot 0,4 \cdot 9,81 \cdot 0,7} = 2,34m/s = 8,4km/h \quad (3.6)$$

Per quanto riguarda la velocità post urto del manichino si può assumere un drag factor  $d_f=0,6g$  ed una distanza totale percorsa di 3,7m ed ottenere:

$$\overline{V_D} = \sqrt{2d_f gx} = \sqrt{2 \cdot 0,6 \cdot 9,81 \cdot 3,7} = 6,58m/s = 23,7km/h \quad (3.7)$$

La componente nella direzione X risulta:

$$\overline{V_{D_x}} = \sqrt{2d_f gx} = \sqrt{2 \cdot 0,6 \cdot 9,81 \cdot 3,4} = 6,32m/s = 22,8km/h \quad (3.8)$$

e dalla conservazione della quantità di moto nella direzione X:

$$m_A \overline{V_{A_x}} + (m_M + m_D) \overline{V_{M_x}} = m_A \overline{V_{A_x}} + m_M \overline{V_{M_x}} + m_D \overline{V_{D_x}} \quad (3.9)$$

si ricava la velocità d'impatto della moto:

$$\overline{V_{M_x}} = \overline{V_M} = 47,7km/h \quad (3.10)$$

contro il valore effettivo di 44,4km/h.

Se ad esempio, si assume un valore di 0,3g come coefficiente globale d'attrito per l'auto, si ottiene un valore della velocità d'impatto della moto di 55,1km/h; ciò dimostra l'elevata sensibilità dei modelli impulsivi nella ricostruzione degli urti tra auto moto a causa dell'elevata differenza tra le masse dei veicoli coinvolti. Nella reale ricostruzione si preferisce utilizzare tali modelli soprattutto come verifica a posteriori. L'adozione dei modelli impulsivi rende il calcolo applicabile ma non sempre affidabile, se non accompagnato da altre relazioni e metodi di supporto. Ricostruire la fase d'urto tramite l'approccio energetico risulta più stabile e affidabile. Bisogna però verificare se tale metodo risulta ugualmente affidabile e se la relazione che lega l'energia di deformazione e la velocità relativa prima dell'urto risulta valida anche per gli urti in cui è presente il motociclista al momento dell'impatto.



La relazione (3.1) è stata ricavata direttamente utilizzando i principi dell'urto tramite considerazioni teoriche precise; analizzando invece urti con conducente, eseguendo gli stessi passaggi e considerazioni svolte non si riesce ad ottenere analiticamente una relazione simile.

Le velocità post-urto della moto, del suo conducente e dell'auto possono essere determinate risolvendo il sistema lineare di tre equazioni in tre incognite costituito dalle equazioni della conservazione della quantità di moto nelle due direzioni ortogonali di riferimento:

$$\begin{aligned} m_A V_{Ar} + (m_M + m_D) V_{Mr} &= m_A \overline{V_{Ar}} + m_M \overline{V_{Mr}} + m_D \overline{V_{Dr}} \\ m_A V_{Aq} + (m_M + m_D) V_{Mq} &= m_A \overline{V_{Aq}} + m_M \overline{V_{Mq}} + m_D \overline{V_{Dq}} \end{aligned} \quad (3.11)$$

e dall'equazione che esprime il coefficiente di restituzione tra veicolo a due ruote ed auto:

$$\varepsilon(V_{Mr} - V_{Ar}) = \overline{V_{Ar}} - \overline{V_{Mr}} \quad (3.12)$$

Il sistema sarà del tipo:

$$\begin{bmatrix} m_A \cos \bar{\alpha} & m_M \cos \bar{\beta} & m_D \cos \bar{\gamma} \\ m_A \sin \bar{\alpha} & m_M \sin \bar{\beta} & m_D \sin \bar{\gamma} \\ -\cos \alpha & \cos \beta & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overline{V_A} \\ \overline{V_M} \\ \overline{V_D} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_A V_A \cos \alpha + (m_M + m_D) V_M \cos \beta \\ m_A V_A \sin \alpha + (m_M + m_D) V_M \sin \beta \\ \varepsilon(V_A \cos \alpha - V_M \cos \beta) \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

in cui con  $m$  sono state indicate le masse, con  $\alpha, \beta, \gamma, \bar{\alpha}, \bar{\beta}, \bar{\gamma}$  gli angoli di ingresso e di uscita dall'urto, con  $V$  e  $\bar{V}$  le velocità di ingresso e di uscita dall'urto, con  $\varepsilon$  il coefficiente di restituzione e con i pedici A, M e D rispettivamente le grandezze riferite all'auto, alla moto e al conducente (dummy).

Per ottenere un sistema di tre equazioni in tre incognite è stato imposto scorrimento nullo durante l'urto; inoltre non vengono considerate le rotazioni dei corpi intorno all'asse verticale come conseguenza del fatto che è stato scelto un modello a due gradi di libertà.

La risoluzione del sistema nella ricostruzione degli urti reali risulta difficoltosa poiché generalmente non si dispongono di elementi sufficienti a studiare il moto post-urto dei tre corpi (auto, moto e conducente) e in particolare a stimare le velocità e gli angoli di uscita dall'impatto del motociclista e della moto.

Per la risoluzione degli impatti con conducente è stata quindi identificata una formulazione, analoga alla (3.1), che consenta di determinare la velocità relativa tra moto e auto attraverso la conoscenza dell'energia cinetica dissipata dall'intero sistema.

La soluzione analitica delle equazioni della conservazione della quantità di moto e dell'energia, che nel caso di urto tra due corpi porta alla (3.1), nel caso di tre corpi non è esplicitabile nella velocità relativa iniziale tra moto ed auto e la soluzione deve essere ricercata numericamente.

Con l'obiettivo di trovare una formulazione approssimata, sono state effettuate delle simulazioni numeriche in ambiente LabView. Assunti noti a priori i dati di ingresso all'urto e gli angoli di uscita, risolvendo il sistema (3.13), sono state determinate le velocità di uscita dall'impatto.

Determinate le velocità di uscita dall'urto dei tre corpi, incognite in ciascuna simulazione, è possibile calcolare, mediante l'equazione della conservazione dell'energia, l'energia dissipata nel singolo impatto:

$$E_d = \frac{1}{2} m_A V_A^2 + \frac{1}{2} (m_M + m_D) V_M^2 - \frac{1}{2} m_A \bar{V}_A^2 - \frac{1}{2} m_M \bar{V}_M^2 - \frac{1}{2} m_D \bar{V}_D^2 \quad (3.14)$$

I casi fisicamente non possibili, ovvero quelli con energia di deformazione negativa, sono stati scartati.

Correlando a questo punto, per ciascun caso simulato, i valori di velocità relativa iniziale all'energia cinetica dissipata calcolata con la (3.14), è stata individuata una equazione che meglio approssima le velocità relative calcolate a quelle impostate nella simulazione.

### 3.1.3 Simulazione numerica in ambiente LabVIEW

I dati di input nella simulazione, come si nota dal sistema 3.13 sono le masse dei corpi, le velocità d'impatto, le direzioni pre impatto e post impatto. Tali valori sono stati scelti in accordo con le varie tipologie di autoveicoli e mezzi a due ruote circolanti. In particolare, per quanto riguarda la massa dell'auto è stata scelta nell'intervallo 800 – 1800kg; analogamente la massa del mezzo a due ruote nell'intervallo 70 – 300kg e la massa del pilota nell'intervallo 60 – 140kg e tali valori sono stati scelti arbitrariamente ricoprendo tutto il range di variabilità.

Prendendo in considerazione le velocità, le simulazioni sono state fatte con auto inizialmente ferma ( $V_A=0$ ) e con la moto (di conseguenza anche del dummy) con velocità scelte arbitrariamente nell'intervallo 15 – 99km/h, tale semplificazione facilita lo studio in quanto la velocità relativa coinciderà con la velocità della moto e l'asse di restituzione coinciderà con la direzione d'impatto della moto.

Gli impatti sono stati simulati con sette diverse configurazioni differenti (figura 3.3); in particolare sono stati simulati:

- Urti frontali (o posteriori)
- Urti laterali a 90°
- Urti laterali a 45°
- Urti frontali (o posteriori) a 45°
- Urti laterali a 20°
- Urti frontali (o posteriori) a 20°
- Urti laterali a 65°

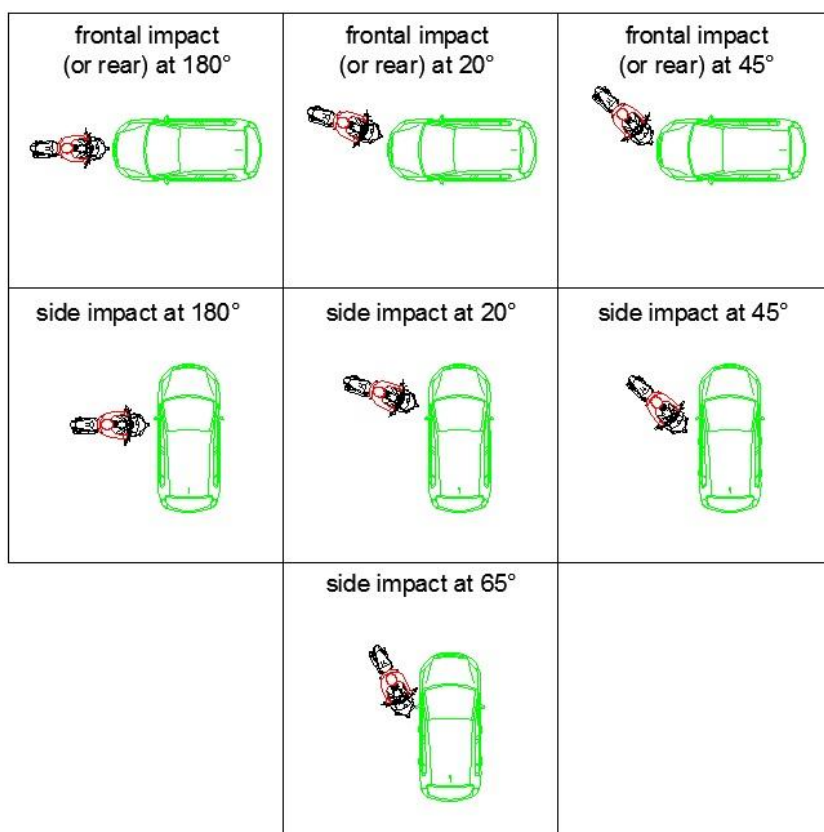


Figura 3.3 - Tipologie di urti simulati.

Per ogni tipologia d'impatto sono stati simulati cinquanta casi con masse e velocità scelte negli intervalli sopracitati per arrivare a 350 casi totali. Per quanto riguarda il coefficiente di restituzione  $\epsilon$  questo è stato assunto, in funzione della

velocità d'impatto con un andamento simile a quello trovato sperimentalmente da Antonetti [27].

Gli angoli delle traiettorie post urto dei tre corpi, per ciascun caso simulato sono stati selezionati attraverso un campionamento gaussiano con il metodo MonteCarlo, all'interno di un intervallo di variabilità identificato mediante delle stime effettuate a partire da rilievi e filmati di crash test svolti in analoghe configurazioni di impatto. Di conseguenza è stato imposto un numero elevato di cicli (dell'ordine di  $10^5$ ) per ogni caso simulato per far "spazzare", in maniera casuale tutto l'intervallo inoltre i casi inverosimili, cioè con energia di deformazione negativa o comunque inferiore ad un minimo prestabilito sono stati automaticamente scartati dal programma.

L'esecuzione dell'applicativo realizzato in ambiente LabView (figura 3.4), una volta realizzata la matrice di input, ha fornito una matrice 350 x 10 del tipo riportato in tabella 3.1 nella quale a ciascun caso simulato sono associate le velocità di uscita dei tre corpi e l'energia globalmente dissipata.

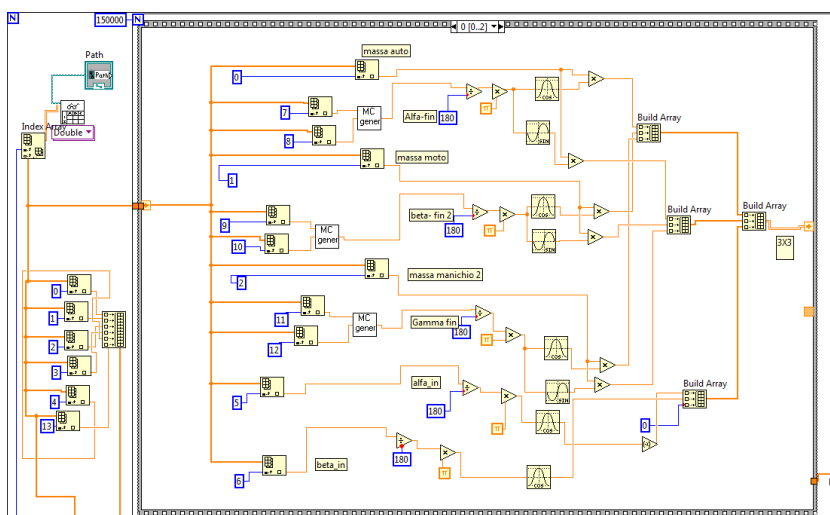


Figura 3.4 – Applicativo programmato in LabView.

Tabella 3.1 – Estratto della matrice 350 x 10 ottenuta dalla simulazione in LabView dei 350 impatti.

<b>M<sub>auto</sub></b> <b>(kg)</b>	<b>M<sub>moto</sub></b> <b>(kg)</b>	<b>M<sub>dummy</sub></b> <b>(kg)</b>	<b>V<sub>iA</sub></b> <b>(km/h)</b>	<b>V<sub>iM</sub></b> <b>(km/h)</b>	<b>ε</b>	<b>V<sub>fA</sub></b> <b>(km/h)</b>	<b>V<sub>fM</sub></b> <b>(km/h)</b>	<b>V<sub>fD</sub></b> <b>(km/h)</b>	<b>E<sub>d</sub></b> <b>(kJ)</b>
1150	125	75	0	43	0,21	7,2	1,9	20,6	10,094
1080	190	80	0	52	0,20	12,2	2,3	28,6	18,156
880	210	65	0	65	0,18	17,4	5,7	52,0	24,891
1790	85	85	0	55	0,19	4,9	5,5	25,4	15,081
1640	80	70	0	45	0,21	4,0	5,4	15,7	9,644
1875	70	115	0	62	0,19	5,6	6,2	27,4	20,456
1250	115	125	0	33	0,25	6,2	2,0	8,3	7,568
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

In prima battuta è stata calcolata la velocità relativa con l'equazione solitamente impiegata per le collisioni tra due corpi, valida per urti non completamente plastici:

$$V_R = \sqrt{\frac{2E_d}{m_c(1-\varepsilon^2)}} \quad (3.15)$$

Come si nota dal grafico di figura 3.5 le velocità stimate con la (3.15) risultano sovrastimate e le dispersioni risultano sempre più marcate all'aumentare della velocità.

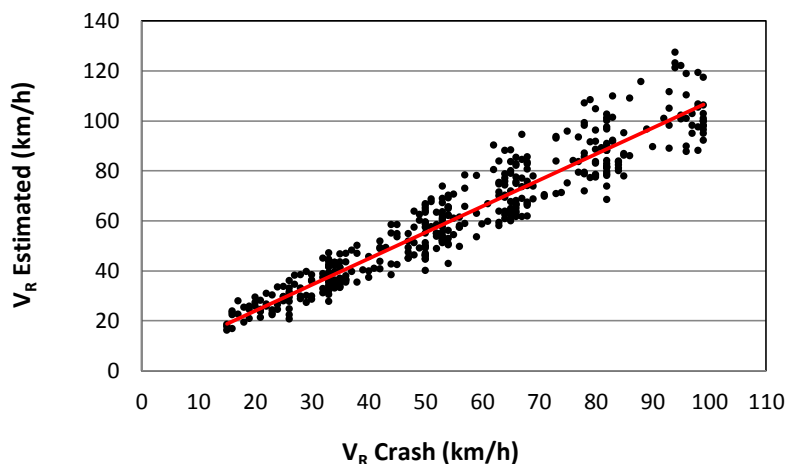


Figura 3.5 - Confronto tra la velocità relativa impostata nella simulazione e quella calcolata con la (3.15) per i 350 casi simulati.

Il conducente del motoveicolo seppur non vincolato rigidamente al mezzo, ha un'influenza sulla deformazione plastica dei veicoli. Il valore della velocità relativa stimato con la (3.15), che trascura del tutto la massa del motociclista, risulta di conseguenza sovrastimato.

Negli impatti con il motociclista, alle fasi citate nel capitolo 2 nelle quali veniva evidenziato il moto del veicolo durante l'urto, si aggiunge il moto del conducente che, non essendo rigidamente vincolato al proprio mezzo, è caratterizzato dalle seguenti fasi:

- scivolamento del corpo sulla sella del motoveicolo;
- contatto tra gli arti inferiori del dummy e la parte frontale del motoveicolo (o con l'auto stessa);
- rototraslazione del corpo del dummy che lo proietta in avanti rispetto alla direzione di arrivo.

La rototraslazione del corpo del motociclista è favorita o meno dal punto dell'auto colpito dal veicolo a due ruote e dalla velocità relativa all'urto, oltre che dalla geometria del serbatoio della moto o dello scudo, nel caso di scooter.

Nei casi in cui il punto di contatto sia nella parte frontale o sui fianchetti anteriori dell'auto vi è una maggiore possibilità che il conducente venga proiettato oltre l'auto non trovando davanti a sé ostacoli che né possano fermare il moto. Al contrario, la probabilità diminuisce se il contatto avviene nella zona laterale in corrispondenza delle portiere; in tali casi il motociclista tende a rimanere bloccato tra l'auto e la moto.

Poiché la massa del conducente incide sulla deformazione del veicolo, è opportuno considerarla nel calcolo della velocità relativa dei veicoli.

Pesando la massa del motociclista in funzione della massa del motoveicolo stesso secondo la seguente relazione,

$$\eta = \frac{m_D}{(m_D + m_M)} \quad (3.16)$$

e applicando l'equazione della massa corretta aggiungendo il contributo appena citato, otteniamo un'equazione per la stima della velocità relativa del tutto analoga alla (3.1) che approssima in modo soddisfacente il valore di  $V_R$  cercato. L'equazione è del tipo:

$$V_R = \sqrt{\frac{2E_d}{m^*(1-\varepsilon^2)}} \quad (3.17)$$

in cui  $m^*$  è dato da:

$$m^* = \frac{m_A(m_M + \eta m_D)}{m_A + (m_M + \eta m_D)} \quad (3.18)$$

In figura 3.6 sono riportati i valori delle velocità relative calcolate con l'equazione (3.17) per 350 urti simulati. La nuvola di dati è ben distribuita intorno alla retta a  $45^\circ$ , con standard deviation pari a 3,5 km/h.

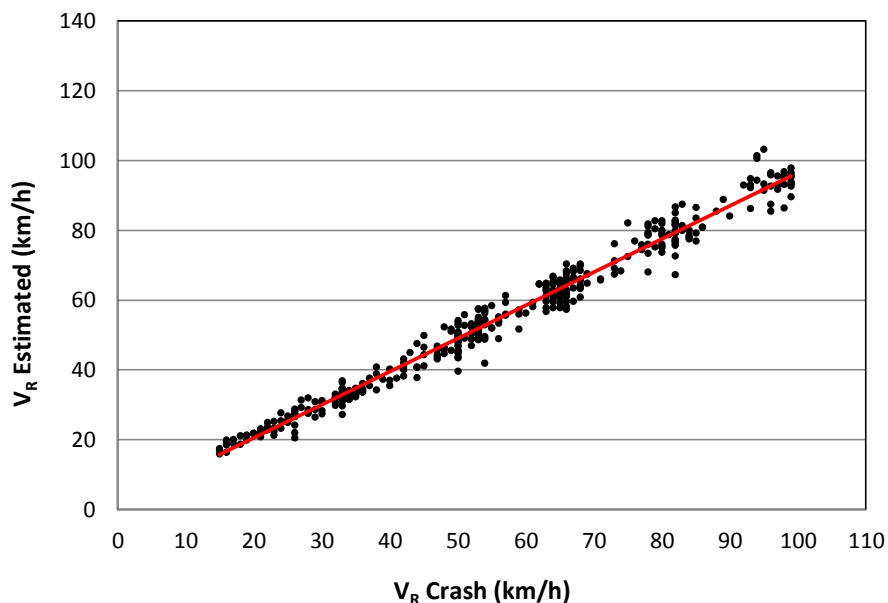


Figura 3.6 - Confronto tra la velocità relativa impostata nella simulazione e quella calcolata con la (3.17) per i 350 casi simulati.

La relazione trovata empiricamente, in quanto non ottenibile per via teorica, seppur approssimare ottimamente la stima della velocità relativa, necessita di essere verificata tramite i dati sperimentali.

### 3.2 Validazione con prove sperimentali

Al fine di validare la relazione trovata tramite best fitting sui risultati della simulazione numerica, è stata condotta una campagna di prove sperimentali nella quale sono stati riprodotti impatti tra autoveicolo e motociclo con manichino a bordo. Tutte le prove sono state eseguite con l'autoveicolo inizialmente fermo e posizionato a contrasto con una barriera fissa, tale da rendere nullo il suo moto post-urto, al fine di rendere più semplice e sicuro il calcolo del contributo energetico post urto dei tre corpi. Il sistema di lancio adottato è lo stesso utilizzato per le prove sperimentali descritte in precedenza. Sul mezzo a due ruote è stato posto un manichino non strumentato, del peso di 80kg (figura 3.7). La stabilità del manichino nella fase di lancio è stata garantita, non alterando il moto durante l'urto ed il post-urto, da collegamenti adesivi tra mani e sterzo e da un puntello di legno di massa trascurabile.



Le prove sono state condotte su scooter a diverse velocità di impatto e colpendo l'auto in diversi target: portiera, fianchetto anteriore, zona frontale. Sul mezzo a due ruote sono stati incollati due marker a distanza nota in modo da poter stimare la velocità post urto dal filmato ad alta velocità.

Prima di ciascun crash test, i motoveicoli sono stati pesati e ne è stato misurato il passo. Al termine della prova è stato determinare l'accorciamento del passo, effettuando una doppia misura da ambo i lati del mezzo, ed è stata misurata la massima introflessione presente sull'autoveicolo.



Figura 3.7 - Prove di crash test tra auto e moto con conducente svolte presso l'Università degli Studi di Firenze.

In totale sono state condotte 6 prove con 6 scooter diversi nel range di velocità tra 30 e 50 km/h (tabella 3.2).

Tabella 3.2 – Prove sperimentali condotte per la validazione della (3.17)

ID	Motoveicolo	Peso (kg)	Velocità (km/h)	Auto
1	Yamaha Majesty	160,0	33,0	Fiat 500
2	Aprilia Leonardo	135,0	40,0	Fiat 500
3	Piaggio Liberty	109,0	41,8	Fiat Punto
4	Lambretta 151-N	111,0	49,0	Opel Corsa
5	Outlook 150	116,0	42,0	Opel Corsa
6	Kymco People	101,0	43,0	Opel Corsa

### 3.2.1 Prove auto-moto con conducente

#### **PROVA ID 1**

La prima prova è stata svolta su uno scooter Yamaha Majesty (figura 3.8), la velocità di impatto rilevata tramite le fotocellule e la telecamera ad alta velocità è di 33,0km/h. Il mezzo a due ruote ha mantenuto il suo assetto verticale fino al momento dell'impatto, colpendo l'autoveicolo fianchetto anteriore destro (figura 3.9).

Tabella 3.3 – Dati relativi alla prova ID 1.

Tipo di prova	Crash test auto-moto con dummy
Motoveicolo	Yamaha Majesty
Autoveicolo	Fiat 500
Massa motoveicolo	160 kg
Massa autoveicolo	700 kg
Velocità di impatto	33,0 km/h
Velocità di uscita motoveicolo	5,4 km/h
Velocità di uscita dummy	30,9 km/h
Passo motoveicolo	152 cm
Accorciamento passo ( $\Delta p$ )	11 cm
Introflessione autoveicolo (C)	6 cm



Figura 3.8 - Veicoli del test ID 1.



Figura 3.9 - Veicoli dopo l'impatto del test ID 1.

Il passo originale del motoveicolo era di 152cm, dopo la prova la misura rilevata è stata di 141cm, si misura quindi un accorciamento del passo pari a 11cm.

Di conseguenza, per il principio della conservazione dell'energia, l'energia cinetica globalmente dissipata nell'urto è pari a:

$$E_{d,crash} = \frac{1}{2}(m_M + m_D)V_M^2 - \frac{1}{2}m_M\bar{V}_M^2 - \frac{1}{2}m_D\bar{V}_D^2 = 7346J \quad (3.19)$$

### **PROVA ID 2**

La seconda prova è stata svolta su uno scooter Aprilia Leonardo (figura 3.10), la velocità di impatto rilevata tramite le fotocellule e la telecamera ad alta velocità è di 40,0km/h. Il mezzo a due ruote ha mantenuto il suo assetto verticale fino al momento dell'impatto, colpendo l'autoveicolo nel centro della portiera destra (figura 3.11).

Tabella 3.4 – Dati relativi alla prova ID 2.

Tipo di prova	Crash test auto-moto con dummy
Motoveicolo	Aprilia Leonardo
Autoveicolo	Fiat 500
Massa motoveicolo	135 kg
Massa autoveicolo	700 kg
Velocità di impatto	40,0 km/h
Velocità di uscita motoveicolo	13,0 km/h
Velocità di uscita dummy	37,8 km/h
Passo motoveicolo	132 cm
Accorciamento passo ( $\Delta p$ )	11 cm
Introflessione autoveicolo (C)	15 cm

Tipo di prova: crash test auto-moto con dummy

Motoveicolo: Aprilia Leonardo

Autoveicolo: Fiat 500

Massa motoveicolo: 135 kg

Massa auto: 700 kg

Velocità di impatto: 40,0 km/h

Velocità di uscita moto: 13,0 km/h

Velocità di uscita dummy: 37,8 km/h

Interasse moto: 132 cm

Accorciamento passo ( $\Delta p$ ): 11 cm

Introflessione massima sull'autoveicolo: 15 cm



Figura 3.10 - Veicoli del test ID 2.



Figura 3.11 - Veicoli dopo l'impatto del test ID 2.

Il passo originale del motoveicolo era di 132cm, dopo la prova la misura rilevata è stata di 121cm, si misura quindi un accorciamento del passo pari a 11cm.

Di conseguenza, per il principio della conservazione dell'energia, l'energia cinetica globalmente dissipata nell'urto è pari a:

$$E_{d,crash} = \frac{1}{2}(m_M + m_D)V_M^2 - \frac{1}{2}m_M\bar{V}_M^2 - \frac{1}{2}m_D\bar{V}_D^2 = 8533J \quad (3.20)$$

### **PROVA ID 3**

La terza prova è stata svolta su uno scooter Piaggio Liberty (figura 3.12), la velocità di impatto rilevata tramite le fotocellule e la telecamera ad alta velocità è di 41,8km/h. Il mezzo a due ruote ha mantenuto il suo assetto verticale fino al momento dell'impatto, colpendo l'autoveicolo nel centro della portiera destra (figura 3.13).

Tabella 3.5 – Dati relativi alla prova ID 3.

Tipo di prova	Crash test auto-moto con dummy
Motoveicolo	Piaggio Liberty
Autoveicolo	Fiat Punto
Massa motoveicolo	109 kg
Massa autoveicolo	910 kg
Velocità di impatto	41,8 km/h
Velocità di uscita motoveicolo	9,2 km/h
Velocità di uscita dummy	40,0 km/h
Passo motoveicolo	132 cm
Accorciamento passo ( $\Delta p$ )	19 cm
Introflessione autoveicolo (C)	12 cm





Figura 3.12 - Veicoli del test ID 3.



Figura 3.13 - Veicoli dopo l'impatto del test ID 3.

Il passo originale del motoveicolo era di 132cm, dopo la prova la misura rilevata è stata di 113cm, si misura quindi un accorciamento del passo pari a 19cm.

Di conseguenza, per il principio della conservazione dell'energia, l'energia cinetica globalmente dissipata nell'urto è pari a:

$$E_{d,crash} = \frac{1}{2}(m_M + m_D)V_M^2 - \frac{1}{2}m_M\bar{V}_M^2 - \frac{1}{2}m_D\bar{V}_D^2 = 8088J \quad (3.21)$$

#### **PROVA ID 4**

La quarta prova è stata svolta su uno scooter Lambretta 151-N (figura 3.14), la velocità di impatto rilevata tramite le fotocellule e la telecamera ad alta velocità è di 49,0km/h. Il mezzo a due ruote ha mantenuto il suo assetto verticale fino al momento dell'impatto, colpendo l'autoveicolo nel centro della portiera sinistra (figura 3.15).

Tabella 3.6 – Dati relativi alla prova ID 4.

Tipo di prova	Crash test auto-moto con dummy
Motoveicolo	Lambretta 151-N
Autoveicolo	Opel Corsa
Massa motoveicolo	111 kg
Massa autoveicolo	900 kg
Velocità di impatto	49,0 km/h
Velocità di uscita motoveicolo	9,0 km/h
Velocità di uscita dummy	43,0 km/h
Passo motoveicolo	131 cm
Accorciamento passo ( $\Delta p$ )	19 cm
Introflessione autoveicolo (C)	12 cm



Figura 3.14 - Veicoli del test ID 4.



Figura 3.15 - Veicoli dopo l'impatto del test ID 4.

Il passo originale del motoveicolo era di 131cm, dopo la prova la misura rilevata è stata di 112cm, si misura quindi un accorciamento del passo pari a 19cm.

Di conseguenza, per il principio della conservazione dell'energia, l'energia cinetica globalmente dissipata nell'urto è pari a:

$$E_{d,crash} = \frac{1}{2}(m_M + m_D)V_M^2 - \frac{1}{2}m_M\bar{V}_M^2 - \frac{1}{2}m_D\bar{V}_D^2 = 12534J \quad (3.22)$$

### **PROVA ID 5**

La quarta prova è stata svolta su uno scooter Outlook 150 (figura 3.16), la velocità di impatto rilevata tramite le fotocellule e la telecamera ad alta velocità è di 42,0km/h. Il mezzo a due ruote ha mantenuto il suo assetto verticale fino al momento dell'impatto, colpendo l'autoveicolo nella parte anteriore della portiera destra (figura 3.17).

Tabella 3.7 – Dati relativi alla prova ID 5.

Tipo di prova	Crash test auto-moto con dummy
Motoveicolo	Outlook 150
Autoveicolo	Opel Corsa
Massa motoveicolo	111 kg
Massa autoveicolo	900 kg
Velocità di impatto	42,0 km/h
Velocità di uscita motoveicolo	12,6 km/h
Velocità di uscita dummy	38,8 km/h
Passo motoveicolo	136 cm
Accorciamento passo ( $\Delta p$ )	14 cm
Introflessione autoveicolo (C)	11 cm



Figura 3.16 - Veicoli del test ID 5.





Figura 3.17 - Veicoli dopo l'impatto del test ID 5.

Il passo originale del motoveicolo era di 136cm, dopo la prova la misura rilevata è stata di 122cm, si misura quindi un accorciamento del passo pari a 14cm.

Di conseguenza, per il principio della conservazione dell'energia, l'energia cinetica globalmente dissipata nell'urto è pari a:

$$E_{d,crash} = \frac{1}{2}(m_M + m_D)V_M^2 - \frac{1}{2}m_M\bar{V}_M^2 - \frac{1}{2}m_D\bar{V}_D^2 = 8601J \quad (3.23)$$

### **PROVA ID 6**

La quarta prova è stata svolta su uno scooter Kymco People (figura 3.18), la velocità di impatto rilevata tramite le fotocellule e la telecamera ad alta velocità è di 43,0km/h. Il mezzo a due ruote ha mantenuto il suo assetto verticale fino al momento dell'impatto, colpendo l'autoveicolo nella parte anteriore della portiera destra (figura 3.19).

Tabella 3.8 – Dati relativi alla prova ID 6.

Tipo di prova	Crash test auto-moto con dummy
Motoveicolo	Outlook 150
Autoveicolo	Opel Corsa
Massa motoveicolo	111 kg
Massa autoveicolo	900 kg
Velocità di impatto	43,0 km/h
Velocità di uscita motoveicolo	6,8 km/h
Velocità di uscita dummy	38,0 km/h
Passo motoveicolo	136 cm
Accorciamento passo ( $\Delta p$ )	21 cm
Introflessione autoveicolo (C)	2 cm

In figura 32 sono riportati i due veicoli prima dell'urto:



Figura 3.18 - Veicoli del test ID 6.



Figura 3.19 - Veicoli dopo l'impatto del test ID 6.

Il passo originale del motoveicolo era di 136cm, dopo la prova la misura rilevata è stata di 115cm, si misura quindi un accorciamento del passo pari a 21cm.

Di conseguenza, per il principio della conservazione dell'energia, l'energia cinetica globalmente dissipata nell'urto è pari a:

$$E_{d,crash} = \frac{1}{2}(m_M + m_D)V_M^2 - \frac{1}{2}m_M\bar{V}_M^2 - \frac{1}{2}m_D\bar{V}_D^2 = 8970J \quad (3.24)$$

### 3.2.2 Analisi dei risultati

Le prove effettuate, e descritte nel paragrafo precedente, consentono di verificare la bontà con cui viene stimata la velocità relativa attraverso l'equazione

(3.17) trovata in precedenza. Calcolando la velocità relativa  $V_R$  attraverso la relazione ottenuta dalla simulazione che si riporta per completezza:

$$V_R = \sqrt{\frac{2E_d}{m^*(1-\varepsilon^2)}} \quad (3.25)$$

con:

$$m^* = \frac{m_A(m_M + \eta m_D)}{m_A + (m_M + \eta m_D)} \quad (3.26)$$

dove il coefficiente  $\eta$  è così definito:

$$\eta = \frac{m_D}{(m_D + m_M)} \quad (3.27)$$

è possibile verificare il modello confrontando la velocità relativa reale con la velocità calcolata inserendo nell'equazione l'energia cinetica dissipata realmente nel crash test. Come si può osservare dalla tabella 3.9 e dalla figura 3.20, l'equazione fornisce una stima soddisfacente della velocità relativa dei vicoli coinvolti nell'urto. L'errore massimo non supera il i 2,5 km/h e la retta di miglior approssimazione presenta un coefficiente di correlazione pari a 0,93.

Tabella 3.9 –  $V_R$  stimata con la (3.17): errore assoluto e percentuale.

ID	$V_{R\_crash}$ (km/h)	$V_{R\_stimata}$ (km/h)	Errore	Errore %
1	33,0	35,3	-2,3	7,09
2	40,0	39,9	0,1	0,24
3	41,8	40,2	1,6	3,77
4	49,0	49,9	-0,9	1,78
5	42,0	40,8	1,2	2,75
6	43,0	43,2	-0,2	0,50

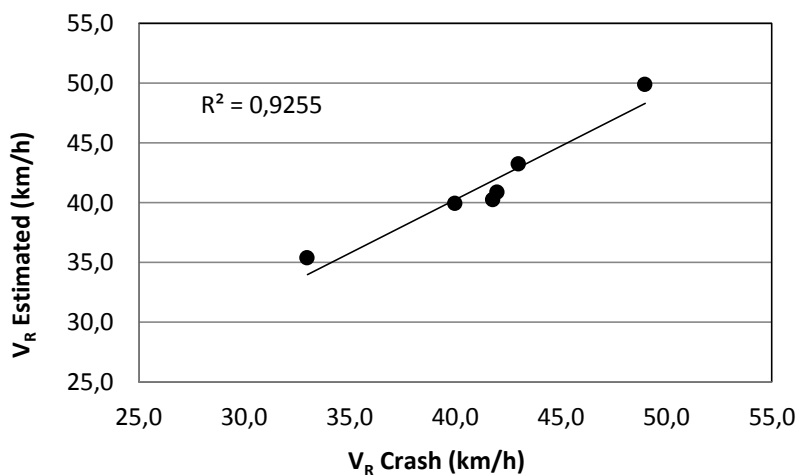


Figura 3.20 –  $V_R$  stimata con la (3.17) in funzione della  $V_R$  reale.

Ad ulteriore verifica, e come applicazione della formulazione proposta per il calcolo della velocità relativa, per i 6 test sopra descritti, è stata stimata la velocità relativa mediante la (3.15) e la (3.17) valutando l'energia cinetica dissipata nell'urto con il metodo semi-empirico presentato nei paragrafi precedenti, cioè come se i casi fossero degli incidenti reali di cui si deve stimare l'energia dissipata attraverso l'analisi delle deformazioni.

In tabella 3.10 sono evidenziati i valori di  $V_R$  determinati con le due equazioni. Come in precedenza già mostrato, utilizzando la formulazione (3.15), valida nei casi in cui siano presenti solo due corpi, la velocità risulta mediamente sovrastimata (figura 3.21). La differenza media rispetto ai valori reali è di circa 1,3 km/h se viene applicata l'equazione (3.17) e di -2,6 km/h applicando la (3.15).

Tabella 3.10 –  $V_R$  stimate con la (3.15) e la (3.17) per i 6 test effettuati, valutando l'energia dissipata col modello semi-empirico illustrato nel capitolo precedente.

ID test	$V_{R\_crash}$ (km/h)	Ed_crash (J)	Ed stimata (J)	$V_{R\_2 \text{ corpi}}$ (km/h)	Err 2 corpi (km/h)	$V_{R\_3 \text{ corpi}}$ (km/h)	Err 3 corpi (km/h)
1	33,0	7365	7275	37,1	-4,1	35,1	-2,1
2	40,0	8533	8121	41,9	-1,9	38,9	1,1
3	41,8	8088	8219	45,0	-3,2	40,5	1,3
4	49,0	12534	10694	51,0	-2,0	46,1	2,9
5	42,0	8269	7894	43,0	-1,0	39,1	2,9
6	43,0	8970	8203	46,4	-3,4	41,3	1,7

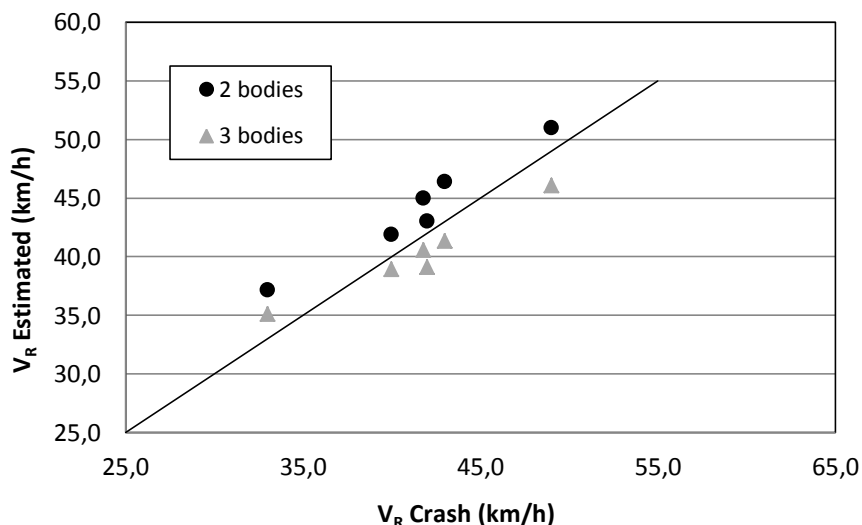


Figura 3.21 –  $V_R$  stimata con la (3.15) e la (3.17) in funzione della  $V_R$  reale, calcolando l'energia dissipata con il modello semi-empirico sviluppato.

I 6 crash test appena illustrati confermano nuovamente anche la buona stima che si ottiene nella valutazione dell'energia cinetica dissipata in questa tipologia di urti applicando il modello semi-empirico mostrato in precedenza. Applicando le formulazioni per il calcolo dell'energia dissipata dal motociclo e dall'autoveicolo e correggendo quest'ultima nei casi in cui la deformazione sull'auto si estende al di sopra del cerchione del mezzo a due ruote, si ottengono buone stime dell'energia dissipata con errori massimi inferiori ai 1900J ed un errore medio percentuale di circa il 6,5%.

### 3.2.3 Riscontro con crash test di letteratura

A conclusione di questa attività si riporta di seguito l'applicazione del modello semi-empirico sviluppato per la stima dell'energia di deformazione dissipata nell'urto e l'applicazione dell'equazione (3.17) per la stima della velocità relativa del motociclo ad alcuni crash test reperibili in letteratura tecnica.

Nel dettaglio verranno presi in considerazione i test svolti da Priester [26] nei quali vengono riprodotti degli urti tra auto e moto con conducente. Anche in questi test l'autoveicolo è inizialmente fermo e disposto a 90° rispetto alla direzione di arrivo del motociclo. Il veicolo a due ruote viene portato in movimento da un furgone che lo traina fino all'impatto (figura 3.22). Le 6 prove che prenderemo in riferimento sono riportate nella tabella sottostante.



Figura 3.22 – Metodo di traino adottato da Priester nei suoi crash test tra auto e moto.

Tabella 3.11 – Test di letteratura utilizzati per verifica della formulazione proposta per il calcolo della  $V_R$  con tre corpi.

ID	Motoveicolo	Peso (kg)	Velocità (km/h)	Auto
1	Honda CB 400N	195,0	100,0	Mitsubishi Lancer
2	Honda CB 250N	183,0	95,0	Peugeot 305
3	Suzuki GSX 400	190,0	96,0	Renault 21
4	Honda CB 250N	180,0	96,0	VW Passat
5	Yamaha XS 360	176,0	99,0	VW Scirocco
6	Yamaha XS 360	179,0	98,0	Audi 80

Non essendo stata riportata nella pubblicazione l'energia cinetica dissipata in ciascun test, è stato necessario stimarla applicando il metodo presentato in precedenza. Utilizzando le deformazioni dei due veicoli riportate dall'autore è stata stimata l'energia dissipata dal motoveicolo e dall'auto attraverso rispettivamente le seguenti equazioni:

$$E_{d,M} = \frac{1}{2} m_M (EES)^2 \quad (3.28)$$

$$E_{d,A} = \frac{1}{2} M_M (b_0 b_1 + b_1^2 \Delta p) (kC + \delta) \quad (3.29)$$

Per tutti e sei test l'energia dissipata dall'autoveicolo è stata corretta visto che la deformazione si estendeva sull'auto, con stessa entità, ben al di sopra dell'altezza da terra del cerchione del motoveicolo.

Applicando ora le equazioni per la stima della velocità relativa sopra viste, si nota (tabella 3.12) che la formulazione trovata, da applicare quando all'urto il conducente del motoveicolo è ancora alla guida del proprio mezzo, stima con maggior precisione la velocità relativa del veicolo a due ruote. Solamente in un caso l'errore supera i 10km/h.

Tabella 3.12 – Errore assoluto commesso nei test di letteratura applicando la (3.1) e la (3.17).

ID	V <sub>R_crash</sub> (km/h)	Ed stimata (J)	V <sub>R_2 corpi</sub> (km/h)	Errore (km/h)	V <sub>R_3 corpi</sub> (km/h)	Errore (km/h)
1	100	75700	111,7	-11,7	106,0	-6
2	95	66870	110,9	-15,9	100,9	-5,9
3	96	64109	105,1	-9,1	96,5	-0,5
4	96	75431	119,9	-23,9	107,8	-11,8
5	99	57480	100,7	-1,7	95,1	4,1
6	98	60744	103,8	-5,8	95,9	2,1

La verifica con i crash test di letteratura ha permesso inoltre di verificare la bontà delle formulazioni e dei modelli sviluppati anche a range di velocità maggiori, mostrando anche per essi buoni risultati in termini di stima di velocità relativa prima dell'urto.





## **PARTE II: TAMPONAMENTI A BASSA VELOCITÀ**



## 4 Il colpo di frusta cervicale

Il colpo di frusta è un evento lesivo al livello del rachide cervicale dovuto ad un brusco avanzamento del busto rispetto alla testa. Questo fenomeno è tuttora non completamente compreso nonostante sia estesamente studiato dalle industrie automobilistiche, all'origine di buona parte delle controversie legali attivate a seguito di incidenti stradali ed oggetto di attente, seppur difficoltose, valutazioni mediche. La sua comprensione ha valenza in attività che vanno dalla perizia ricostruttiva dei sinistri stradali, alla pratica medica per la diagnosi, cura e riabilitazione dei soggetti colpiti, al riconoscimento del danno subito in sede legale e assicurativa.

Il problema si presenta particolarmente difficile a causa:

1. della complessità del fenomeno;
2. delle incertezze sulle misure disponibili;
3. della non univocità delle interpretazioni di volta in volta prodotte.

Le prime incertezze riguardano l'investigazione sui sinistri stradali a causa:

1. della carenza di informazioni;
2. della notevole differenze nei risultati ottenuti variando di poco i dati iniziali (fatto dovuto alle non-linearità geometriche e materiali).

In Italia la distorsione del rachide cervicale è senza dubbio la lesione che si verifica con maggiore frequenza negli incidenti stradali, tale lesione è lamentata dagli occupanti di un veicolo tamponato sia nel caso di urti a bassa velocità che nel caso di urti a più alta velocità: ogni 100 danni alla persona, ci sono 66 richieste di risarcimento per questo motivo.

La cervicale ha una curva (lordosi) con convessità in avanti e concavità indietro; la colonna cervicale si muove in flessione/estensione in modo armonico a

partire dalla testa, appiattendolo e accentuando la curva lordotica. In caso di tamponamento a livello delle vertebre C5 e C6 va indietro nelle prime fasi con C5 flessa in avanti; dopo che C6 ha raggiunto la massima estensione, C5 comincia ad estendersi: in questo momento le vertebre cervicali inferiori sono in estensione, mentre quelle superiori sono in una posizione di relativa flessione producendo una forma ad S della colonna vertebrale cervicale. Questo movimento differisce dal normale movimento fisiologico che avviene dall'alto verso il basso. Si ritiene che questo schema di movimento anormale possa giocare un ruolo nello sviluppo del colpo di frusta.

Il colpo di frusta si verifica quando, in seguito ad un tamponamento, la parte superiore del corpo viene spinta violentemente contro lo schienale, mentre la testa, a causa del suo peso, rimane prima sospesa in una sorta di vuoto e successivamente viene colpita dal poggiatesta.

La fase dannosa (prima fase) consiste nell'insorgenza della configurazione ad S caratterizzata da (figura 4.1):

1. iperestensione del tratto inferiore;
2. iperflessione del tratto superiore.

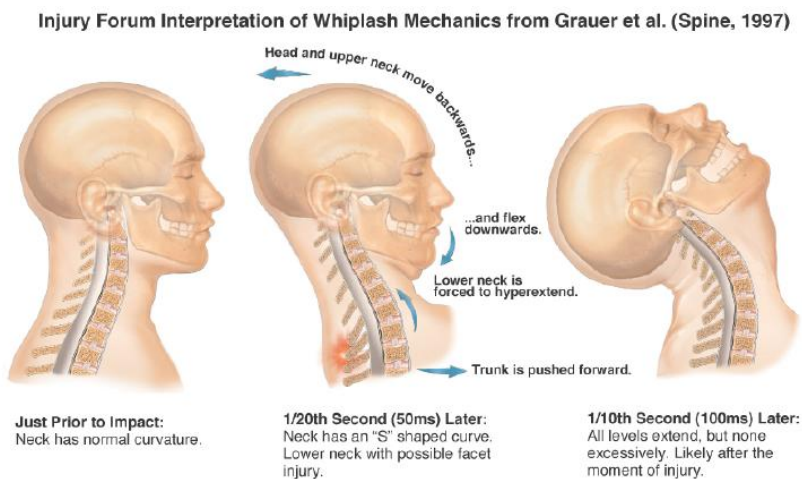


Figura 4.1 – Dinamica del colpo di frusta.

Tale configurazione è causata dalla differenza di fase tra l'avanzamento del tronco e quello della testa, ritardato dagli effetti inerziali.

La seconda fase del colpo di frusta consiste in una iperestensione del collo. L'ultima fase può consistere in una iperflessione del collo dovuto al vincolo imposto dalla cintura al tronco. È tuttora controversa l'influenza del sistema neuromuscolare cervicale.

In letteratura tutti i sintomi e i disturbi che sono conseguenza del "colpo della frusta" sono raccolti in una Sindrome: WAS – Whiplash Associate Disorders: dolore cervicale, vertigini, fischi nelle orecchie, mal di testa, dolore infrascapolare, dolore alle spalle, formicolii alle braccia e alle mani, senso di instabilità, difficoltà nella concentrazione, disturbi del sonno, appannamento della vista, rigidità del collo, dolore mandibolare, senso di costrizione in gola, sono tutti esempi di disturbi ricollegabili allo stesso trauma.

Durante un tamponamento l'autovettura colpita viene accelerata in avanti e di conseguenza, con un certo ritardo di tempo, anche il busto dell'occupante che è a contatto con il sedile.

Il danno biologico è legato al fatto che il collo deve trasmettere alla testa l'accelerazione in avanti applicata dal sedile al busto. La testa d'altra parte ha una notevole massa, quindi la sollecitazione al collo sarà tanto maggiore quanto più grande è l'inerzia della testa nella figura sottostante è riportato un esempio di accelerazione dell'autovettura, delle spalle e della testa, come si può vedere le tre curve raggiungono valori di picco differenti a istanti di tempo diversi.

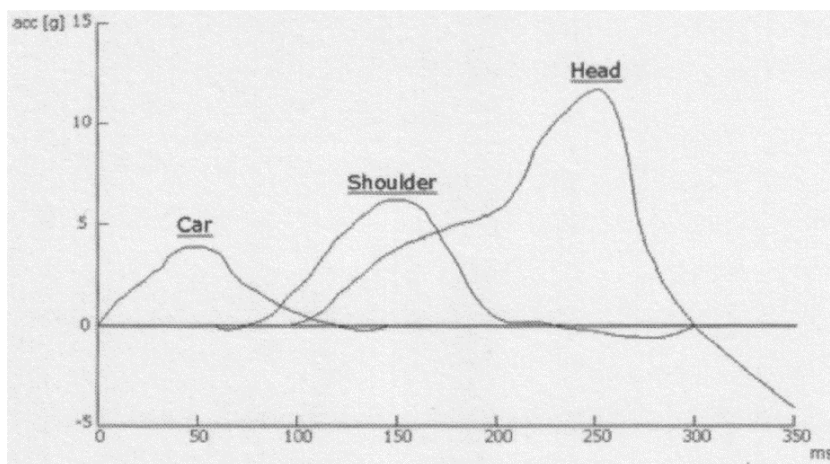


Figura 4.2 – Esempio di accelerazioni auto, spalle e testa.

## 4.1 Risposta cinematica degli occupanti

Quella che segue è la descrizione della risposta cinematica tipica nel caso di tamponamento a bassa velocità descritta in [28]

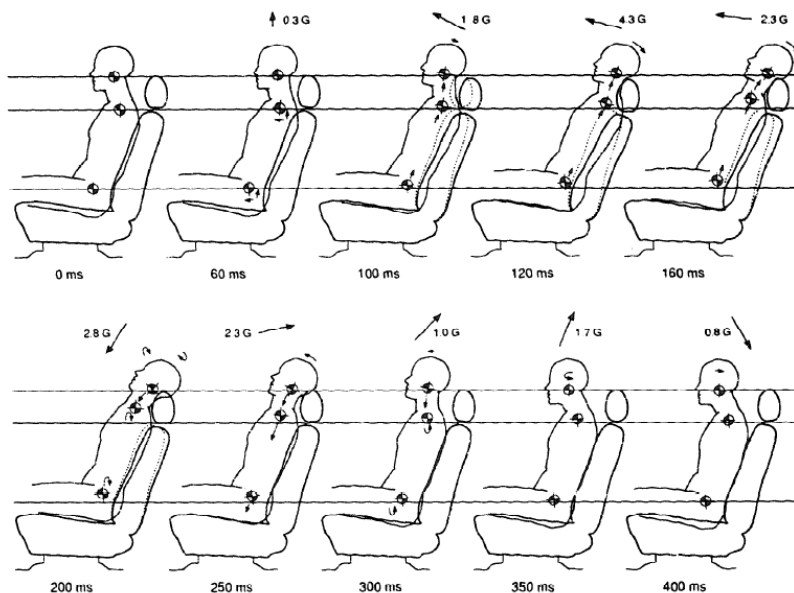


Figura 4.3 – Risposta cinematica degli occupanti nei tamponamenti a bassa velocità.

L'auto comincia a muoversi all'istante zero, non appena cioè sente l'impulso di accelerazione. L'intero corpo dell'occupante invece, appare immobile durante i primi 50ms, mentre il veicolo ed il sedile del conducente si spostano in avanti di circa 5-8 centimetri. A circa 60ms dall'impatto la parte inferiore dello schienale è diventato abbastanza compresso per iniziare a muovere anche la parte bassa della schiena del soggetto del test in avanti e verso l'alto. Nello stesso momento la parte alta dello schienale si flette all'indietro rispetto al veicolo, il busto del soggetto è ancora quasi fermo.

A circa 100ms lo schienale raggiunge la posizione di massima flessione all'indietro, la parte superiore del tronco del soggetto compie un movimento in avanti e verso l'alto. Intorno ai 120ms il bacino e il tronco si muovono verso l'alto seguendo una traiettoria parallela a quella dello schienale, la colonna cervicale inizia a muoversi verso l'alto e all'indietro rispetto al veicolo che si muove in avanti e la testa inizia a ruotare verso l'alto e all'indietro rispetto alle spalle. Dai 160ms

dopo l'urto, il movimento in avanti e verso l'alto della parte superiore del tronco mette in tensione anche la testa imponendo ad essa un movimento in avanti.

A circa 200ms il movimento del tronco delle spalle finisce: l'estensione e la rotazione angolare della testa si fermano a circa 45° indietro rispetto alla verticale. Il punto di riferimento sulla cervicale è salito di circa 1,25cm rispetto alla posizione di partenza. Dai 250ms il rimbalzo della testa in avanti non ha ancora raggiunto la verticale, ma il tronco, il collo e la testa stanno scendendo con un percorso parallelo al sedile. Da ora in poi il sedile si trova nella posizione iniziale pre-urto, ed il tronco è rimbalzato in avanti lontano dalla schienale. A questo punto la parte superiore del corpo del soggetto viene frenata dalla cintura.

Dopo 300ms dall'impatto il movimento del busto è completo ed il soggetto si muove sostanzialmente alla stessa velocità del veicolo. Il moto di rimbalzo in avanti della testa, adesso quasi verticale, continua, ma essa viene decelerata dalla tensione del collo. A circa 400ms la testa raggiunge la posizione più avanzata in avanti, dopodiché inizia a ritornare nella posizione iniziale.

Dopo circa 450ms dall'impatto tutto il corpo dell'occupante si muove circa alla stessa velocità del veicolo ed i movimenti relativi all'urto si concludono. In questo momento la testa approssimativamente nella posizione iniziale pre-urto, mentre le spalle ed il bacino si trovano in una posizione di circa 3,8 cm superiore a quella iniziale.

Il danno provocato dal tamponamento può non dipendere dal fatto di essere andati oltre il movimento fisiologico massimo cervicale. Infatti nei test condotti in [A], pur non raggiungendo mai la massima flessione 3 dei 4 soggetti hanno avuto dei risentimenti fisici.

## 4.2 Le possibili cause di lesione

Tra le possibili cause di lesione del rachide cervicale si evidenzia le seguenti:

1. Iperestensione. L'iperestensione del collo è stata la prima ipotesi valutata cercando di spiegare il fenomeno del colpo di frusta. Tale ipotesi è stata proposta negli anni Sessanta da Macnab secondo il quale il movimento di estensione del collo poteva essere la causa del colpo di frusta, provocando una lesione del basso rachide cervicale. Nel 1969 l'introduzione del poggiatesta obbligatorio nelle

nuove auto in USA ha cercato di limitare questo movimento. Tuttavia, questo fatto non ha ridotto il numero di casi segnalati di colpo di frusta nella proporzione prevista, rendendo evidente la necessità di ulteriori ricerche. Anche se l'iperestensione è ancora una possibile causa di lesione, oggi l'uso esteso dei poggiatesta ha limitato il colpo di frusta a casi particolari, come uso improprio o fallimentare del poggiatesta.

2. Flessione cervicale durante la fase di ritorno. All'opposto del meccanismo precedente, Macnab ha inoltre proposto come ipotesi di lesione la flessione del collo dovuta al movimento prodotto dalla testa quando la cintura di sicurezza agisce sulla fase di ritorno. Questo è stato suggerito dopo l'osservazione di una maggiore frequenza di lesioni cervicali a persone che utilizzano la cintura di sicurezza, e più tardi confermato da altri autori.
3. Gradienti di pressione sul canale spinale. Nel 1986 Aldman ha valutato la possibilità che la variazione di volume prodotta all'interno del canale vertebrale durante i movimenti bruschi del rachide cervicale sul piano sagittale fosse all'origine delle lesioni nei tessuti intervertebrali. Nel 1993, Svensson confermò questa ipotesi, misurando le variazioni di pressione sul canale spinale di maiali anestetizzati, verificando i danni ai gangli spinali che potrebbero spiegare molti dei sintomi tipici del colpo di frusta. In questi esperimenti le più alte oscillazioni di pressione erano riferite allo sfasamento della configurazione ad S della colonna cervicale per l'estensione, e le più alte pressioni venivano registrate nel livello della vertebra C4 durante la forma ad S.
4. Compressione e tensione localizzata durante la forma ad S. Oggi la causa più indiscussa della lesione da colpo di frusta è probabilmente quella relativa all'iperestensione osservata nella parte inferiore del collo durante la forma ad S (vertebre C5, C6 e C7). Nel 1998 Panjabi segnalò che i movimenti intervertebrali osservati a questi livelli durante i test avevano superato i limiti fisiologici, essendo la causa delle lesioni dei legamenti capsulari alle faccette articolari presso il livello C5-C6.

### 4.3 Injury criteria: NIC

Il NIC (Neck Injury Criterion) è la variabile di uscita che fornisce una misura del rischio di lesione al collo che si possono registrar a seguito di un rapido movimento di traslazione della testa quale quello caratteristico della prima fase del



colpo di frusta. Questo parametro non misura la pressione all'interno del canale spinale, ma al suo posto confronta velocità e accelerazioni della testa (intesa come estremità superiore del collo) con la velocità e accelerazione della prima vertebra toracica (in termini di fase e modulo) [29]. Questo, almeno intuitivamente, indica quanto e come è ritardato il moto della testa rispetto al moto del torace.

Stimate le accelerazioni della testa e del torace in funzione del tempo è possibile calcolare il NIC mediante la seguente equazione:

$$NIC = a_{rel} \cdot L + v_{rel}^2 \quad (4.1)$$

dove  $a_{rel}$  rappresenta l'accelerazione relativa, ovvero la differenza tra l'accelerazione del torace e quella della testa:

$$a_{rel} = a_{torace} - a_{testa} \quad (4.2)$$

mentre il valore  $v_{rel}$  rappresenta la velocità relativa in direzione opposta a quella del moto del veicolo e si ottiene:

$$v_{rel}(t) = \int_0^t a_{rel} dt \quad (4.3)$$

La costante  $L$  è un parametro che indica la lunghezza della metà superiore del canale spinale durante il colpo di frusta e generalmente viene assunto pari a 0,2.

Le curve di NIC per quanto differenti l'una dall'altra con il modificarsi delle variabili, hanno tutte un andamento loro dovuto alla cinematica caratteristica del colpo di frusta. Nella Figura 4.4 si osserva un tipico andamento del NIC, con evidenziato nella figura in alto il NICmax, considerato come il valore critico ai fini della lesione cervicale, nella fase di arretramento della testa rispetto al busto. Nella parte bassa della figura 4.4, invece, vengono rappresentate le accelerazioni della testa, e del collo, e la velocità relativa, individuate nell'istante in cui si ottiene il NICmax.

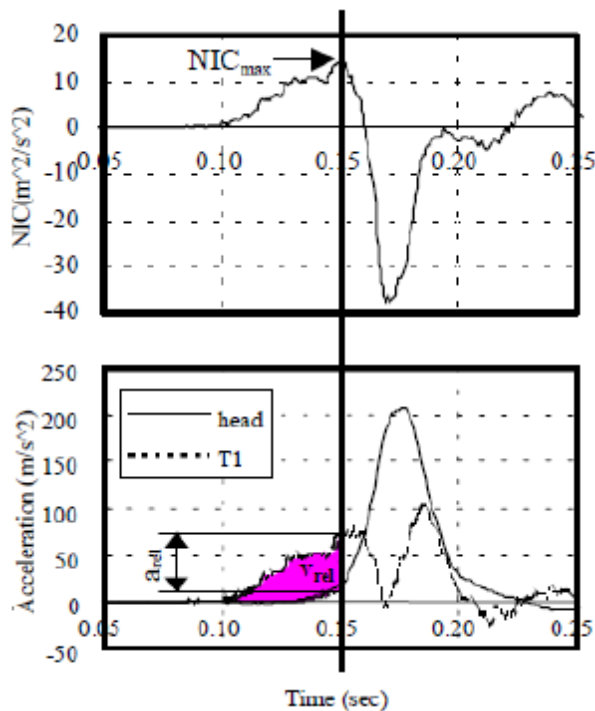


Figura 4.4 - Esempio della relazione tra NIC e accelerazioni della testa e della T1.

A causa del moto ritardato della testa rispetto al torace, nella prima fase il termine  $a_{rel}$  avrà segno positivo perché l'accelerazione del torace è maggiore dell'accelerazione della testa e il termine  $v_{rel}$  è positivo in quanto nell'equazione compare elevato al quadrato. Questo comporta che nel primo tratto il NIC abbia segno positivo. Per l'invertirsi del segno di  $a_{rel}$  la curva successivamente diventerà negativa quando l'accelerazione della testa sarà maggiore dell'accelerazione del torace.

Per il NIC vengono definiti dei valori di soglia, ovvero livelli di tolleranza che indicano se ci sono lesioni o meno al rachide cervicale. Eichberger, et al. [30] e Wheeler, et al. [31] hanno cercato di convalidare il NIC comparandolo con il livello di lesione sulla salute umana, vale a dire PMHs. Il valore di soglia per infortuni a lungo termine sembra essere  $15\text{m}^2/\text{s}^2$ . Nel frattempo Ono, et al., [32] ha esaminato il moto non solo della cervicale, ma dell'intera spina dorsale ed ha osservato che questa, raddrizzandosi, provoca una compressione assiale della rachide cervicale inferiore, determinando in alcuni casi un impingement sinoviale. Anche se si presume che la forza assiale e l'accelerazione verso l'alto di T1 possa mettere in relazione questo meccanismo, nessuna valutazione quantitativa è stata però eseguita e accreditata.

In accordo con gli studi biomeccanici di Boström, et al. [33], il dato interessante ai fini della determinazione del rischio di lesione cervicale, è rappresentato dal massimo valore di NIC rilevato nei primi 150ms durante la fase di arretramento del collo. Questo perché è correlato in maniera significativa alla misura della pressione nel canale spinale, che causa il danno fisico [30].

In modo indiretto il valore del NIC è influenzato da vari fattori che possono generare perturbazioni sull'accelerazioni (e velocità) dell'auto e della testa indipendentemente dall'accelerazione che genera l'auto tamponante. I fattori maggiormente significativi sono legati al tipo di veicolo, al tipo di urto e alle caratteristiche dell'occupante.

Di seguito verranno evidenziati per ciascuno i parametri che possono influenzare la risposta in termini di NIC.

### 4.3.1 Parametri del veicolo

#### 4.3.1.1 Massa dei veicoli coinvolti

La massa dei veicoli coinvolti nel tamponamento ha un effetto diretto sull'accelerazione subita dal mezzo tamponato. Per capire come la massa dei veicoli coinvolti nel tamponamento influisca direttamente sulla determinazione del parametro NIC, è necessario un breve richiamo sulla dinamica degli urti.

Prendendo in considerazione il principio di conservazione della quantità di moto e il principio di conservazione del momento angolare si ha che queste due grandezze si conservano nel caso in cui il sistema sia esattamente o approssimativamente isolato. Questi due principi da soli non bastano per riuscire a prevedere cosa accadrà dopo l'urto. Infatti è esperienza pratica che un urto può avere esiti assai diversi, pur partendo dalla stessa situazione iniziale per quanto riguarda le masse, posizioni e velocità, a seconda dei materiali costituenti i corpi coinvolti nell'urto.

Analizzando un esempio monodimensionale l'equazione che esprime la conservazione della quantità di moto di due corpi rigidi che traslano è data da:

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 v_{01} + m_2 v_{02} \quad (4.4)$$

I due corpi rigidi con ottima approssimazione possono essere considerati come due punti materiali  $P_1$  e  $P_2$ , scegliendo come centro di riduzione un punto  $O$  sull'asse delle velocità (figura 4.5),

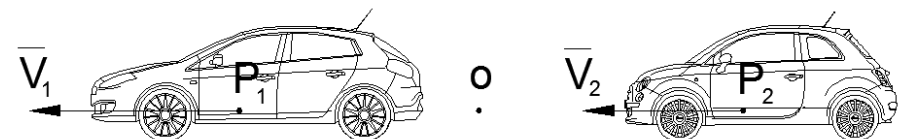


Figura 4.5 – Schematizzazione del tamponamento.

l'equazione di conservazione del momento angolare risulta:

$$(P_1 - O) \wedge \bar{v}_1 m_1 + (P_2 - O) \wedge \bar{v}_2 m_2 = 0 \quad (4.5)$$

Da questo è evidente che queste due equazioni da sole non sono sufficienti per poter determinare le due incognite  $v_1$  e  $v_2$  in quanto l'equazione della conservazione del momento angolare non fornisce, in questo caso, alcuna informazione utile: i prodotti vettoriali sono entrambi nulli.

Per poter determinare le due incognite è necessario introdurre un parametro che caratterizzi in qualche modo il materiale dei veicoli coinvolti. Il coefficiente di restituzione caratteristico dei due materiali urtatisi definito come:

$$\varepsilon = \frac{v_1 - v_2}{v_{01} - v_{02}} \quad (4.6)$$

Questo coefficiente risulta compreso sempre tra zero ed uno: nei due casi estremi l'urto è chiamato rispettivamente perfettamente anelastico e perfettamente elastico.

Conoscendo le velocità iniziali e il coefficiente di restituzione dalle equazioni del coefficiente di restituzione e dall'equazione della conservazione della quantità di moto si può facilmente determinare le due incognite  $v_1$  e  $v_2$  che sono le velocità dei due corpi dopo l'urto.

Passando al caso in cui i due corpi coinvolti nell'urto siano due veicoli, dove il pedice t sta per target e il pedice b sta per bullet, dalle combinazioni delle due equazioni precedenti si ottiene la variazione di velocità del veicolo colpito:

$$\Delta V_t = (v_{0b} - v_{0t})(1 + \varepsilon) \frac{m_b}{m_b + m_t} \quad (4.7)$$

Nel caso in cui il veicolo colpito sia inizialmente fermo indica che la sua velocità di uscita sarà direttamente proporzionale alla massa del veicolo che colpisce ed inversamente proporzionale alla somma delle masse dei due veicoli.

Ricordando che la velocità di uscita del veicolo colpito è uguale a:

$$\Delta V_t = \int_1^2 a_t(t) + v_{0t} \quad (4.8)$$

Con  $t_1$  e  $t_2$  rispettivamente il tempo di inizio urto e fine urto, da questa e dalla precedente equazione si nota che a parità di durata dell'impatto le accelerazioni durante l'urto sono tanto maggiori quanto maggiore è il fattore:

$$M = \frac{m_b}{m_b + m_t} \quad (4.9)$$

Quindi è plausibile affermare che la velocità di uscita del veicolo colpito è tanto maggiore quanto maggiore è la massa del veicolo tamponante rispetto alla somma delle due masse. Questo comporta anche delle maggiori accelerazioni nel tempo, infatti l'accelerazione cui è soggetto il veicolo colpito cresce con la massa del veicolo tamponante e al diminuire di quella del veicolo colpito.

Quest'ultima affermazione è in accordo con quanto messo in evidenza in [34, 35, 36] i quali sottolineano come il rischio di lesione aumenta al diminuire della massa del veicolo tamponato e viceversa.

#### 4.3.1.2 Rigidezza del sedile del veicolo tamponato

Il sedile è un elemento molto discusso in letteratura. È di fondamentale importanza, in quanto è il responsabile della forma della curva di accelerazione cui è soggetto il busto nel tempo, e quindi influenza indirettamente tutte le accelerazioni delle parti del corpo interessate dal fenomeno. Piuttosto che di rigidezza del sedile bisognerebbe parlare più in generale di caratteristiche meccaniche e geometriche, in quanto la rigidezza dipende da questi. Da una parte infatti è importante la rigidezza in campo elastico, dall'altra le è anche il comportamento in campo plastico, nel caso che la violenza dell'impatto comporti deformazioni plastiche degli elementi del sedile. In questi casi si deve tener conto del fatto che una parte di energia dell'urto viene dissipata nella plasticizzazione.

La rigidezza del sedile non può essere considerata separatamente dagli altri fattori. Infatti una notevole deformazione del sedile dovuta alla sua minor rigidezza o ai maggiori carichi meccanici, si ripercuotano sulla effettiva geometria schienale-poggiatesta al momento del verificarsi della lesione da questo segue anche una modificazione della cinematica della testa, sia per quanto riguarda gli angoli di rotazione raggiunti rispetto al busto, sia per l'istante di tempo in cui tali angoli vengono raggiunti (figura 4.6).

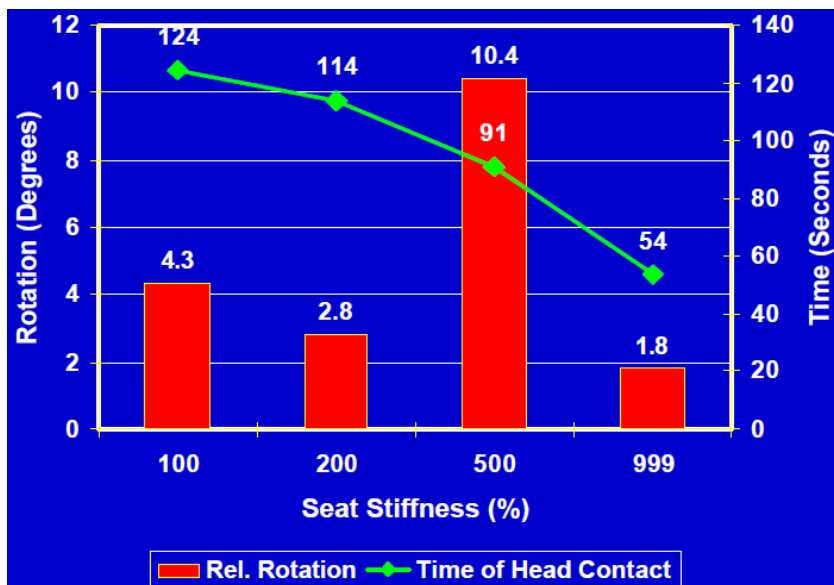


Figura 4.6 – Rotazioni massime della testa in funzione della rigidità [37].

In [38, 39] viene mostrato come una maggior rigidità dello schienale produce un maggior rischio di lesività.

Le case automobilistiche negli anni hanno introdotto dei componenti che rendono cedevoli alcuni vincoli del sedile oppure, tramite deformazione, reagiscono con un'azione sulla dinamica del corpo del passeggero riducendo gli effetti lesivi del moto relativo tra torace e testa. Generalmente questi sistemi di sicurezza sono installati su automobili di fascia di prezzo medio-alta e possono essere:

1. Proattivi: che intervengono grazie all'input di un sensore che aziona il meccanismo di sicurezza preposto;
2. Reattivi o attivi: che intervengono introducendo una cedevolezza nei vincoli del sedile.

Il sistema Whips è stato sviluppato da Volvo ed il suo principio di funzionamento sta nel rendere cedevole il sistema di reclinazione del poggia schiena all'indietro permettendo così di ridurre l'accelerazione e la velocità relativa tra testa e torace.

Il sistema SAHR cerca invece tramite un sistema a leva, di minimizzare la distanza tra testa e poggiatesta sfruttando la pressione del busto sul poggia schiena, che affossandosi, spinge il poggiatesta verso la nuca dell'occupante evitando la formazione della tipica forma ad S del rachide cervicale.

Il sistema WIL, infine, sono dei poggiatesta attivi che avanzando, riducono la distanza testa-poggiatesta riducendo il colpo di frusta fra il 10 e il 20%.

#### 4.3.1.3 Geometria del poggiatesta

La protezione che offre un poggiatesta può essere classificata in quattro zone geometriche definite dall'altezza di questo e dalla distanza tra il dietro della testa e la zona di impatto con il poggiatesta. Come si vede dalla figura 4.7 queste zone sono classificate in: buono, accettabile, marginale o scarso. I veicoli con sistemi di ritenuta della testa rientranti nella prima fascia hanno evidenziato una percentuale molto più bassa degli altri di causare danni al collo degli occupanti. Vari istituti di ricerca europei stilano di anno in anno apposite tabelle di qualità del gruppo "sedile-poggiatesta" per ogni modello di autovettura immessa sul mercato; vediamo come suto simili per tipologia possono differenziarsi anche molto in fatto di sicurezza contro il colpo di frusta.

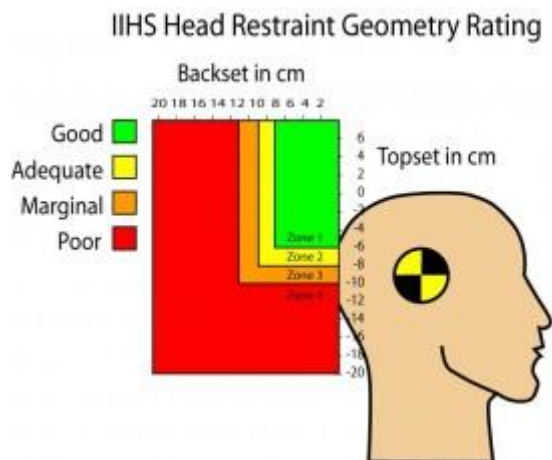


Figura 4.7 – Classificazione della sicurezza offerta dal poggiatesta.

#### 4.3.2 Tipologia di urto

Anche la configurazione con cui si verifica il tamponamento ha un effetto sulla variazione di velocità del veicolo tamponato e quindi sul rischio di lesività.

In [40] sono state effettuate delle simulazioni numeriche con le quali è stato cercato di verificare la variazione della velocità post-urto del veicolo tamponato in funzione della percentuale di overlap della configurazione di tamponamento (ovvero dell'allineamento tra i due veicoli al momento dell'impatto). I risultati dello studio hanno messo in evidenza una diminuzione della

velocità post-urto del veicolo target al diminuire della percentuale di overlap dell'urto. Tale diminuzione è stata riscontrata per le tre velocità di tamponamento testate: 9, 12 e 15km/h. Nel passare da un tamponamento "pieno" (100% di overlap) ad un urto molto disassato (15% di overlap) si ha per i tre valori di velocità testati una riduzione della velocità post-urto del veicolo tamponante di circa il 30% (tabella 4.1)

Tabella 4.1 – Variazione della velocità dell'auto tamponata in funzione della percentuale di overlap.

<b>V<sub>b1</sub>=15km/h</b>		<b>V<sub>b1</sub>=12km/h</b>		<b>V<sub>b1</sub>=9km/h</b>	
Overlap	V <sub>t2</sub>	Overlap	V <sub>t2</sub>	Overlap	V <sub>t2</sub>
100	8,09	100	6,66	100	5,18
82	7,75	90	6,52	72	4,79
68	7,27	74	6,07	59	4,69
54	6,12	65	5,62	50	4,52
35	5,95	50	5,36	36	4,14
25	5,85	35	4,95	24	3,71
14	5,55	20	4,68	14	3,58
		15	4,64		

Negli studi di A. Moser [41] e di M. Avery [42] viene analizzato il disassamento dei paraurti in senso verticale tra veicolo tamponato e tamponante. Quando i paraurti dei veicoli non si trovano alla stessa altezza, l'impatto può concretizzarsi sopra o sotto il paraurti: condizione che modifica la dinamica del tamponamento. La condizione di underride (riferendosi al veicolo tamponato), in cui l'impatto si concretizza sotto il paraurti, si verifica frequentemente non solo per la diversa geometria dei veicoli. È infatti noto che quando i veicoli frenano, spostano il proprio carico sull'asse anteriore generando un abbassamento del mezzo nella parte frontale e un innalzamento in quella posteriore.

Negli articoli sopra citati vengono analizzati tamponamenti tra veicoli identici con e senza azione frenante di entrambi i mezzi prima della collisione (figura 4.8).



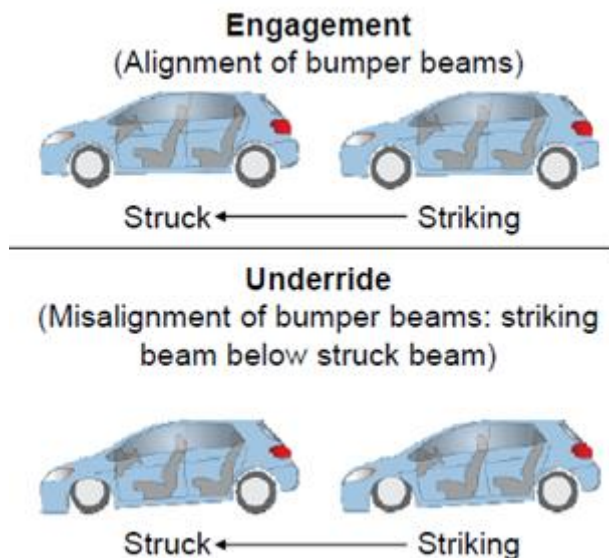


Figura 4.8 – Configurazioni di tamponamento effettuate nelle prove descritte in [41] e [42].

Gli studi oltre ad aver messo in luce una notevole differenza di danni sul veicolo tamponante (figura 4.9) hanno evidenziato una cospicua differenza dell'andamento delle accelerazioni in funzione del tempo del veicolo tamponato e di conseguenza del valore di NIC (figura 4.10).



Figura 4.9 - In alto tamponamento con underride, in basso tamponamento senza underride.  
 $\Delta V=12\text{km/h}$ .

Dalla figura si osserva come nel caso di tamponamento engagement (senza azione frenante del veicolo tamponante) il valore del NIC risulta più elevato, a parità di variazione di velocità, rispetto al caso in cui sia presente un urto con underride.

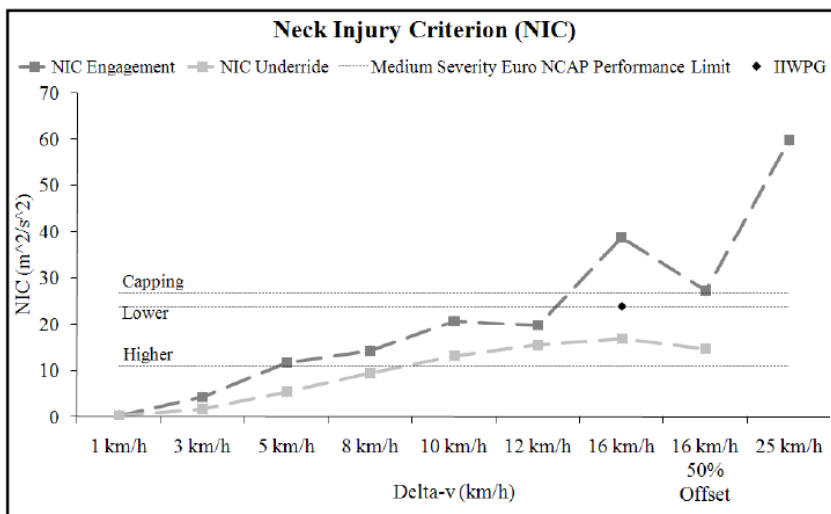


Figura 4.10 – andamento del NIC in funzione della configurazione di tamponamento underride o engagement.

### 4.3.3 Occupante

In letteratura ci sono molti studi finalizzati alla comprensione dell'influenza delle caratteristiche degli occupanti (generalità, corporatura, tensione muscolare) nei confronti del rischio di lesione del rachide cervicale.

Secondo una ricerca tedesca, l'altezza è un fattore di rischio per le lesioni al collo, in particolare per le donne o in generale per le persone di bassa statura, in quanto non sono protette in modo accettabile dai poggiatesta che non possono essere regolati. Questo vale anche per gli uomini di alta statura nel caso non alzino il poggiatesta ad un'altezza tale da proteggerli dal contraccolpo causato dall'impatto.

In [36, 38, 43] viene messo in risalto come le donne siano più a rischio di lesione da colpo di frusta rispetto agli uomini. Inoltre viene rilevato che una percentuale maggiore di donne che avevano subito lesioni al collo, aveva una maggiore probabilità di sviluppare sintomi a lungo termine (il 50% delle donne contro il 38% degli uomini).

L'uso di soggetti umani per i test di tamponamento a bassa velocità è una pratica comune ([44], [45]), allo scopo di studiare le lesioni legate al colpo di frusta. Infatti, mentre negli urti ad alta velocità è possibile usare solo manichini o cadaveri come surrogati, nei test a bassa velocità è possibile usare utilmente anche soggetti umani, considerando anche le scarse prestazioni che in questo tipo di test possono offrire gli usuali surrogati [46]. I risultati di letteratura ottenuti dalle prove con volontari sono soggetti a critiche. Soprattutto vengono criticati i dati delle prove sperimentali su volontari, in quanto questi, sapendo di essere sottoposti a test, potrebbero assumere, anche involontariamente, posture o atteggiamenti difensivi, irrigidendo i muscoli della schiena e del collo tali da alterare i risultati delle prove in termini di accelerazione della testa.

I risultati comuni che si riscontrano in letteratura mostrano che una tensione muscolare maggiore dei muscoli del collo e delle braccia durante un tamponamento, tende a minimizzare il rischio di lesione al rachide cervicale [47, 48]

#### **4.4 Approccio classico per la stima delle sollecitazioni dell'occupante**

Nella realtà il NIC è molto difficile da calcolare e ad oggi non sono presenti database che correlino le deformazioni dei veicoli a questo parametro. Per avere una stima di tale valore il tecnico ricostruttore dovrà quindi necessariamente effettuare una dettagliata analisi della fase di urto. L'approccio classico che tuttora viene ampiamente impiegato, qualora si debba ricostruire una tamponamento a bassa velocità, consiste nello stimare l'accelerazione di picco subita dal veicolo e di conseguenza quella dalla testa dell'occupante. Nel dettaglio il tecnico ricostruttore per valutare le sollecitazioni subite dall'occupante in successione calcola:

- la variazione di velocità subita dal veicolo tamponato nell'impatto
- la durata dell'urto
- l'accelerazione media subita dal veicolo
- l'accelerazione di picco della vettura
- l'accelerazione di picco della testa dell'occupante.

L'approccio seguito risulta affetto da approssimazioni legati sostanzialmente alla valutazione dell'accelerazione subita dalla vettura tamponata.

Già il primo step del processo risulta essere spesso un aspetto molto delicato. La variazione di velocità del veicolo tamponato è nota una volta calcolati il coefficiente di restituzione e la velocità relativa pre-urto.

$$\Delta V_1 = \frac{m_2}{m_1 + m_2} (1 + \varepsilon) V_R \quad (4.10)$$

Per urti a bassa velocità il coefficiente di restituzione può variare notevolmente; determinante è la presenza o meno di deformazioni plastiche nei veicoli. Nella bibliografia tecnica si trovano valori di  $\varepsilon$  superiori a 0,3 (in presenza di deformazioni plastiche) e generalmente inferiori a 0,7 (per urti molto elastici).

La velocità relativa solitamente viene stimata dal tecnico a partire dall'energia cinetica dissipata nell'urto:

$$V_R = \sqrt{\frac{2E_d(m_1 + m_2)}{(1 - \varepsilon^2)m_1m_2}} \quad (4.11)$$

La valutazione dell'energia cinetica dissipata nell'urto può essere fatta utilizzando uno dei seguenti approcci noti in letteratura [49]:

- partendo dalla misura delle deformazioni e dalla conoscenza della rigidità dei veicoli, metodo classico;
- utilizzando il metodo del confronto noto come metodo dell'EES;
- utilizzando il metodo del Triangolo che unisce la semplicità del confronto visivo, tipico del metodo basato sull'EES, alla flessibilità del metodo basato sulla misura delle deformazioni.

Negli urti a bassa velocità spesso risulta difficile applicare i metodi che si basano sulla conoscenza delle deformazioni permanenti dei veicoli in quanto i mezzi incidentati possono essere caratterizzati da profili deformati modesti non sempre rilevabili con esattezza. Per contro il metodo del confronto si caratterizza per la difficoltà di reperire crash test o deformazioni documentate simili a quelle in oggetto per entità, posizione e forma, e per la poca precisione del metodo legata all'esperienza del tecnico.

Detto ciò risulta evidente quanto possa essere molto complesso valutare la variazione di velocità del veicolo tamponato e come la sua stima possa essere affetta da errori a volte non trascurabili.

Per la stima della durata dell'urto di un tamponamento a bassa velocità il tecnico ricostruttore si basa solitamente su studi che legano tale fattore al coefficiente di restituzione, alla deformazione presente sul veicolo, al parametro di rigidità B del veicolo tamponato, al tipo di urto: underride o engagement che si è concretizzato. Di seguito si riportano tipiche tabelle che il ricostruttore utilizza per stimare il tempo di urto e quindi, noto il  $\Delta V$ , l'accelerazione media del veicolo

tamponato. Riferendosi a tabelle empiriche anche la stima della durata dell'urto può essere influenzata da approssimazioni non trascurabili.

VEICOLO	Def. [ mm ]	T [ s ]
▪ BMW 528 (E39)	105	0,11
▪ Audi A4	130	0,11
▪ BMW 316i Compact	130	0,15
▪ VW Golf Variant 1.8	135	0,07
▪ Fiat Punto 55	135	0,11
▪ Ford Mondeo 2.0	140	0,10
▪ Fiat Cinquecento	145	0,11
▪ BMW 316i Coupè	150	0,11
▪ Opel Corsa B 1.6	150	0,10
▪ Suzuki Baleno 1.3	155	0,10
▪ Opel Corsa B 1.6	155	0,11
▪ Vw Polo 1.4	160	0,10
▪ Ford Mondeo 1.6	165	0,10
▪ Ford Mondeo 1.6	170	0,09
▪ Seat Toledo 1.8	180	0,09
▪ Seat Cordoba 1.6	180	0,14
▪ Suzuki Baleno 1.3	195	0,10
▪ Honda Civic Coupè	220	0,11
▪ Audi Cabrio	235	0,12
▪ Mazda 323 F 1.5i	250	0,11
▪ Opel Omega B 2.0	260	0,10

Figura 4.11 – Correlazioni tra le deformazioni presenti sul veicolo e la durata dell'impatto (fonte AZT).

Test #	Coefficient of Restitution	Impact Duration (seconds)
1	0.44	.124
2	0.51	.114
3	0.46	.110
4	0.37	.096
5	0.31	.124
6	0.33	.090
7	0.38	.100

Figura 4.12 - Correlazioni tra il coefficiente di restituzione e la durata dell'impatto.

Infine per la valutazione delle accelerazioni di picco dell'auto e della testa si fa abitualmente uso di coefficienti moltiplicativi determinati sperimentalmente.

Noti i valori di accelerazione dell'auto e della testa dell'occupante risulta possibile stimare il valore del NIC considerando che il moto del tronco del soggetto sia solidale a quello dall'auto.

## 4.5 Utilizzo del dato della scatola nera per la stima delle sollecitazioni dell'occupante

La presenza a bordo dei veicoli della cosiddetta "scatola nera" si sta sempre più diffondendo nel parco auto europeo. In Italia si stima in circa un milione il numero di veicoli già dotati di questa apparecchiatura. La scatola nera, attraverso la registrazione della posizione e velocità del veicolo e, in caso di urto, di dati accelerometrici, viene utilizzata dalle compagnie assicuratrici principalmente per il monitoraggio delle percorrenze chilometriche e dell'incidentalità, ai fini della personalizzazione e riduzione delle tariffe assicurative. Recentemente, le case costruttrici delle scatole nere e le compagnie assicuratrici stanno pensando di utilizzare i dati accelerometrici anche per valutare l'entità delle sollecitazioni subite dagli occupanti, in caso di urti a bassa velocità.

La disponibilità, infatti, del dato di accelerazione del veicolo tamponato, permette di evitare la stima della severità dell'urto a partire dai danni riscontrati sul veicolo, che spesso rappresentano l'unico dato su cui fondare una valutazione della probabilità che vi sia stata una lesione da colpo di frusta.

Le black box sono dispositivi progettati per il mondo automotive e per i sistemi assicurativi. La più importante delle loro funzioni è la rilevazione e registrazione automatica dei crash. Il dispositivo infatti si attiva automaticamente in caso di incidente e in più trasmette in tempo reale i dati a sale operative di assistenza. Solitamente, i produttori di scatole nere devono ottenere omologazioni per poter installare i propri prodotti all'interno degli autoveicoli; tra le principali si ricorda la EC94/54 per la EMC (compatibilità elettromagnetica) e la EC73/23 per la sicurezza elettrica. Inoltre sulle black box vengono effettuati test per certificare la loro "robustezza" a shock meccanici ed elettrici.

La scatola nera registra dati oggettivi utili alla ricostruzione di un sinistro stradale. In particolare:

- Registra la data e l'ora dell'evento
- Registra le posizioni del veicolo prima durante e dopo l'urto
- Registra le accelerazioni occorse durante il sinistro

Il sensore accelerometrico utilizzato nella Box è nella gran parte dei casi di tipo inerziale in grado di rilevare accelerazioni positive e negative, statiche e dinamiche, nelle tre direzioni dello spazio. Solitamente gli accelerometri impiegati, di tipo Mems, sono in grado di rilevare accelerazioni da  $\pm 0,001$  a  $\pm 12g$ . Il sensore viene montato in posizione prossima al baricentro del veicolo e deve essere fissato direttamente sui lamierati della scocca vettura. Viene orientato in modo da misurare le accelerazioni sugli assi longitudinale (x), trasversale (y) e verticale (z) del veicolo (vedi figura 4.13)

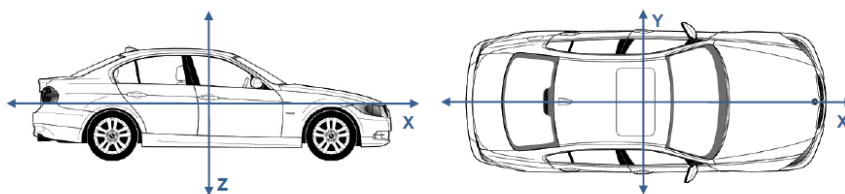


Figura 4.13 – Orientamento dell'accelerometro lungo i tre assi.

I dati accelerometrici vengono solitamente campionati alla frequenza di 1KHz, ma possono essere registrati a frequenza inferiore (100Hz tipica). I valori sono riportati in "g" unità di misura pari alla accelerazione di gravità terrestre ( $9,81m/s^2$ ). La registrazione delle accelerazioni può essere estesa da 1 a 10 secondi nell'intorno dell'evento principale che ha fatto scattare la registrazione.

I dati di localizzazione si basano sul sistema GPS e vengono campionati con frequenza di 1Hz (ovvero 1 valore per ogni secondo) Tali dati comprendono generalmente latitudine, longitudine e velocità espressa in km/h. La latitudine e la

longitudine sono spesso “risolte” in indirizzi stradali. Per ogni secondo di registrazione delle accelerazioni è dunque presente un solo valore di localizzazione. Possono tuttavia essere fornite alcune posizioni antecedenti alla registrazione accelerometrica.

Ricordando l’approccio visto al paragrafo precedente, il quale richiedeva la stima dei dati cinematici,  $\Delta v$  e accelerazioni del veicolo tamponato, per la stima delle lesioni al rachide cervicale, disponendo direttamente dalla scatola nera del dato accelerometrico del veicolo urtato, le informazioni suddette risultano note e non è necessario effettuare alcuna considerazione e ipotesi per determinarle. Nei casi in cui è disponibile il dato accelerometrico del veicolo tamponato il ricostruttore dovrà semplicemente analizzarlo al fine di estrarre la variazione di velocità reale subita dal mezzo e/o l’accelerazione di picco, eliminando così l’incertezza della loro stima legata alle approssimazioni e ipotesi che devono essere fatte necessariamente. In questo modo la sola approssimazione che sarà introdotta per la stima delle lesioni dell’occupante, nel processo visto al paragrafo precedente, risulterebbe legata alla valutazione dell’accelerazione della testa degli occupanti che verrà valutata come in precedenza mediante opportuni coefficienti moltiplicativi che sono stati determinati sperimentalmente.

#### **4.5.1 Qualità del dato acquisito dalla scatola nera: prove di caratterizzazione.**

Come detto in precedenza il dato di accelerazione del veicolo acquisito dalla scatola nera permette di aggirare le difficoltà che derivano nello stimare le sollecitazioni che si propagano agli occupanti a partire dalla semplice analisi dei danni subiti dai veicoli, consentendo di conseguenza un notevole miglioramento della stima delle sollecitazioni e del conseguente rischio di lesione. A fronte della rapida diffusione della scatola nera sugli autoveicoli, si è reso necessario effettuare dei test che mettessero in luce la bontà del dato accelerometrico acquisito da questi strumenti al fine di individuare la qualità del dato acquisito durante un impatto e utilizzato dai tecnici ricostruttori per identificare la possibile lesione degli occupanti. In tal senso è stata condotta un’attività sperimentale per qualificazione dello strumento Clearbox prodotto da Octotelematics. La caratterizzazione dello strumento Clearbox è stata condotta effettuando due tipi di prove di impatto tra veicoli:

- prove di impatto contro barriera rigida,
- con offset al 100%; prove di tamponamento fra due vetture.

Le vetture utilizzate per la sperimentazione, modello Fiat Punto (I serie) e Renault Clio (II serie), sono state equipaggiate con accelerometri Clearbox,



installati dai tecnici Octotelematics, e con accelerometri di riferimento, installati a cura del laboratorio di Meccanica Sperimentale del Dipartimento di Ingegneria Industriale.

La caratterizzazione dello strumento Clearbox è stata condotta mettendo a confronto i segnali accelerometrici acquisiti dalle Clearbox con quelli forniti dagli accelerometri di confronto. Poiché gli urti sui veicoli sono stati di tipo frontale o posteriore, le accelerazioni di maggior rilievo e perciò maggiormente significative, risultano quelle lungo la direzione longitudinale del veicolo, ovvero in direzione identificata con la lettera X. Viceversa, lungo la direzione trasversale (direzione Y) i valori di accelerazione risultano di entità modesta e il loro confronto risulta non particolarmente significativo. Il confronto tra Clearbox e accelerometri di riferimento viene perciò effettuato utilizzando le accelerazioni misurate in direzione longitudinale X.

#### 4.5.1.1 Strumentazione delle vetture

Gli accelerometri Clearbox sono nominalmente tutti identici, e sono individuati attraverso la sigla UNIFlxx dove xx è un numero identificativo progressivo. Sulle due vetture utilizzate gli accelerometri Clearbox sono stati installati secondo lo schema seguente:

- Renault Clio II
  - Accelerometro Clearbox UNIFI04
  - Accelerometro Clearbox UNIFI05
  - Accelerometro Clearbox UNIFI06
- Fiat Punto I
  - Accelerometro Clearbox UNIFI01
  - Accelerometro Clearbox UNIFI02
  - Accelerometro Clearbox UNIFI03

Gli accelerometri di confronto sono identificati con le lettere A, B, C, D ed E, e le loro caratteristiche sono riportate nel paragrafo successivo. Sulle due vetture utilizzate sono stati installati gli accelerometri di confronto secondo lo schema seguente (figura 4.14):

- Prova 1 e prova 2, Renault Clio II:
  - Accelerometro A (figura 4.15a)
  - Accelerometro B (figura 4.15a)
  - Accelerometro D (figura 4.15b)
- Prova 3, Fiat Punto I:
  - Accelerometro A
  - Accelerometro D

- Prova 4 e prova 5, Renault Clio II:
  - Accelerometro A
  - Accelerometro B
  - Accelerometro D
- Prova 4 e prova 5, Fiat Punto I:
  - Accelerometro C
  - Accelerometro E

Gli accelerometri di confronto A, B e D sono stati acquisiti alla frequenza di 12500 S/s; al segnale è stato in seguito applicato un filtro passa-basso a 100Hz.

Gli accelerometri di confronto C ed E sono stati acquisiti alla frequenza di 5000 S/s; al segnale è stato in seguito applicato un filtro passa-basso a 100Hz.

Per ogni segnale si è estratta una finestra temporale di 0,5s; la sincronizzazione dei segnali per i confronti è stata effettuata manualmente quando sono stati acquisiti da strumenti diversi.

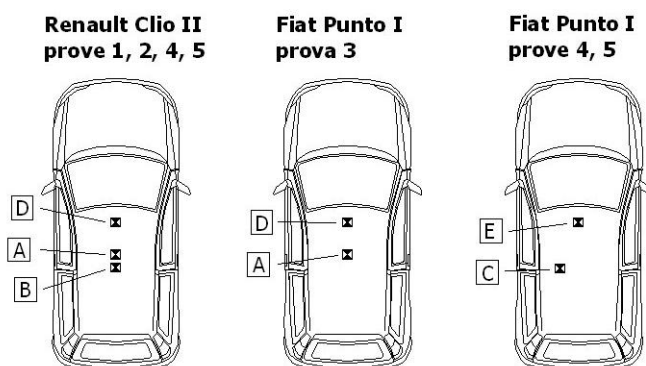


Figura 4.14 – Posizione degli accelerometri di confronto.

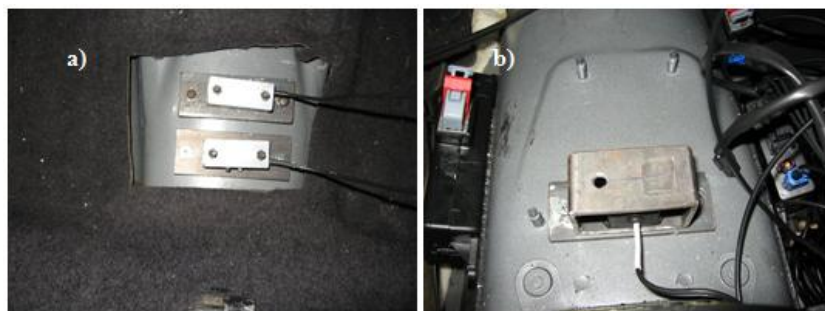


Figura 4.15 – Accelerometri A e B (a) montati sul tunnel posteriore e accelerometro D (b) montato sul tunnel anteriore (Renault Clio II).



Figura 4.16 – Uno degli accelerometri Clearbox montato sulla Renault Clio II.

L'elaborazione dei segnali è stata effettuata considerando positive le accelerazioni longitudinali e trasversali mostrate in figura 4.17.

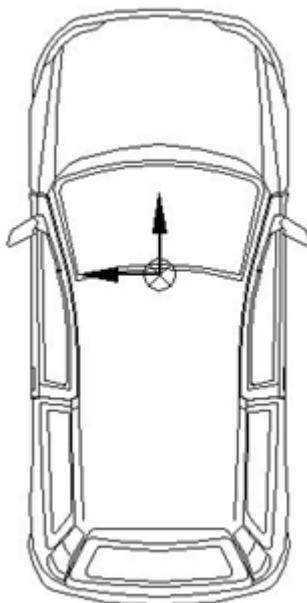


Figura 4.17 – Direzioni positive per le accelerazioni longitudinali e trasversali.

#### 4.5.1.2 Caratteristiche degli accelerometri di confronto

Per le prove di caratterizzazione sono stati usati cinque accelerometri di confronto; le principali caratteristiche sono riassunte nelle tabelle da 4.2 a 4.6.

Tabella 4.2 - Accelerometro A

Produttore	Dytran
Modello	7521A6
Fondo scala (g)	±100
Numero assi	1
Sensibilità asse X (mV/g)	18,1
Sensibilità asse Y (mV/g)	n.a.
Sensibilità asse Z (mV/g)	n.a.
Banda passante (Hz)	0÷400
Tensione di alimentazione	5V cc

Tabella 4.3 – Accelerometro B.

Produttore	Dytran
Modello	7521A6
Fondo scala (g)	±100
Numero assi	1
Sensibilità asse X (mV/g)	18,2
Sensibilità asse Y (mV/g)	n.a.
Sensibilità asse Z (mV/g)	n.a.
Banda passante (Hz)	0÷400
Tensione di alimentazione	5V cc

Tabella 4.4 – Accelerometro C.

Produttore	Crossbow
Modello	CXL25GP3
Fondo scala (g)	±25
Numero assi	3
Sensibilità asse X (mV/g)	80
Sensibilità asse Y (mV/g)	80
Sensibilità asse Z (mV/g)	80
Banda passante (Hz)	0÷100
Tensione di alimentazione	5,5÷36V cc

Tabella 4.5 – Accelerometro D.

Produttore	Crossbow
Modello	CXL100HF3
Fondo scala (g)	$\pm 100$
Numero assi	3
Sensibilità asse X (mV/g)	11
Sensibilità asse Y (mV/g)	10
Sensibilità asse Z (mV/g)	10
Banda passante (Hz)	0,3÷10000
Tensione di alimentazione	6÷30V cc

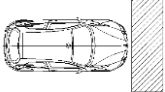
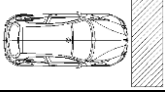
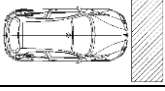
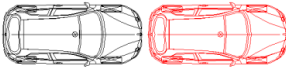
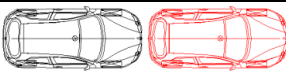
Tabella 4.6 – Accelerometro E.

Produttore	Silicon Designs
Modello	2422
Fondo scala (g)	$\pm 200$
Numero assi	3
Sensibilità asse X (mV/g)	20,03
Sensibilità asse Y (mV/g)	19,87
Sensibilità asse Z (mV/g)	19,88
Banda passante (Hz)	0÷2500
Tensione di alimentazione	5V cc

#### 4.5.1.3 Campagna di test e risultati

L'attività sperimentale è stata svolta effettuando prove di crash sui veicoli, secondo lo schema riportato in tabella 4.7. Per tutte le prove è stato diagrammato l'andamento dell'accelerazione di ciascun accelerometro in funzione del tempo (vedi Appendice A). La comparazione tra gli accelerometri Clearbox e quelli di confronto è stata fatta sulle accelerazioni di picco e per ciascun test è stata evidenziata la differenza dalla media degli accelerometri di confronto.

Tabella 4.7 - Riepilogo delle prove effettuate.

Crash	Tipologia di Crash	Tipologia di Crash	Velocità
1	Crash al 100% contro barriera rigida inamovibile, Renault Clio II		16,8km/h
2	Crash al 100% contro barriera rigida inamovibile, Renault Clio II		11,0km/h
3	Crash al 100% contro barriera rigida inamovibile, Fiat Punto I		8,3km/h
4	Tamponamento a bassa velocità, Fiat Punto I tampona Renault Clio II		16,0km/h
5	Tamponamento a bassa velocità, Fiat Punto I tampona Renault Clio II		20,9km/h

Per l'esecuzione dei crash test è stato adottato lo stesso sistema utilizzato per le prove con le moto. Il movimento, nelle prove di tamponamento, è stato impresso esclusivamente al veicolo bullet.

Per non appesantire l'elaborato, di seguito si riporta esclusivamente i risultati ottenuti per la prova numero 3 che si ricorda essere un urto contro barriera rigida come riportato in tabella 4.8. Per la visione di tutti i grafici si rimanda alla consultazione dell'appendice A.

### **Crash 3**

Tabella 4.8 – Riepilogo prova numero 3.

	8,3 km/h
---	----------

Accelerometri Clearbox installati:

- Accelerometro Clearbox UNIFI01
- Accelerometro Clearbox UNIFI02
- Accelerometro Clearbox UNIFI03

Accelerometri di confronto installati:

- Accelerometro A
- Accelerometro D

Nelle figure seguenti vengono riportate le accelerazioni misurate dagli accelerometri delle Clearbox e dagli accelerometri di riferimento installati.

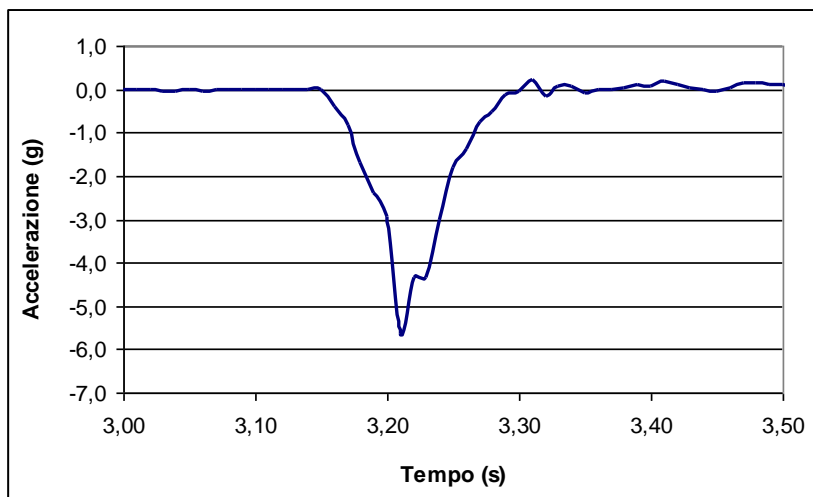


Figura 4.18 - Prova 3, accelerometro UNIFI01, direzione longitudinale (Fiat Punto I).

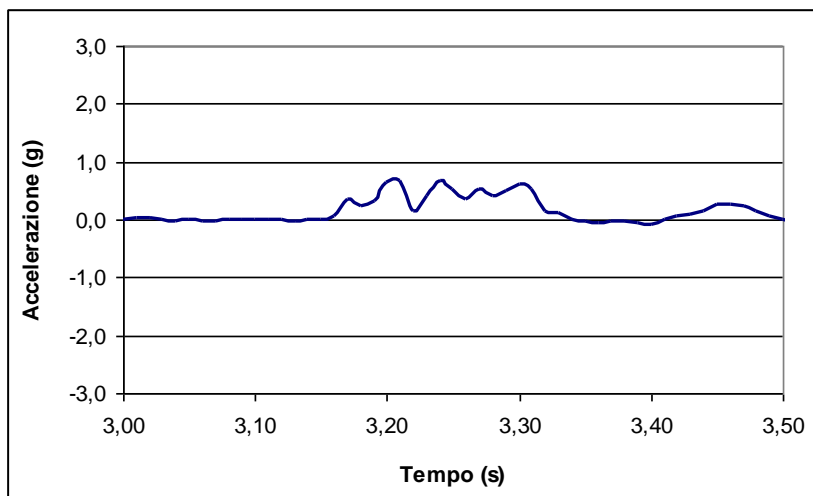


Figura 4.19 - Prova 3, accelerometro UNIFI01, direzione trasversale (Fiat Punto I).

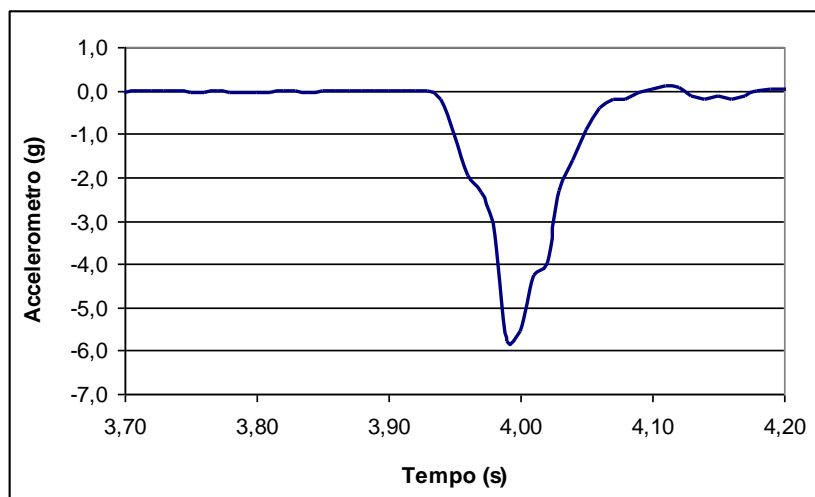


Figura 4.20 - Prova 3, accelerometro UNIFI02, direzione longitudinale (Fiat Punto I).

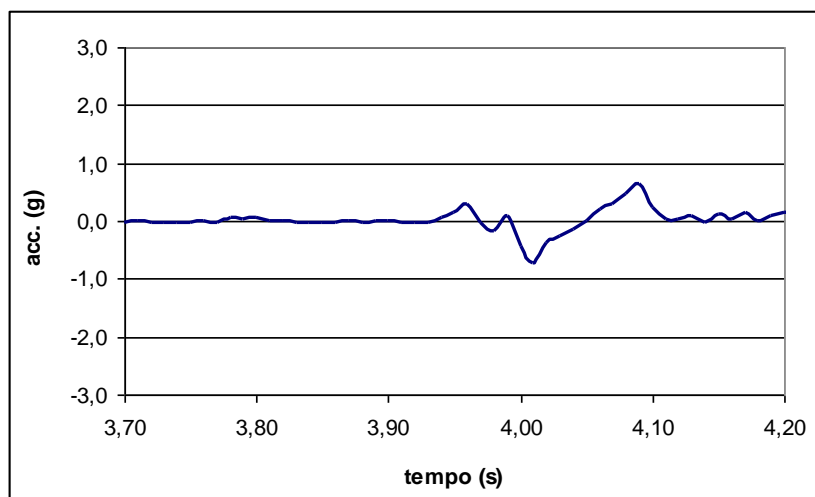


Figura 4.21 - Prova 3, accelerometro UNIFI02, direzione trasversale (Fiat Punto I).



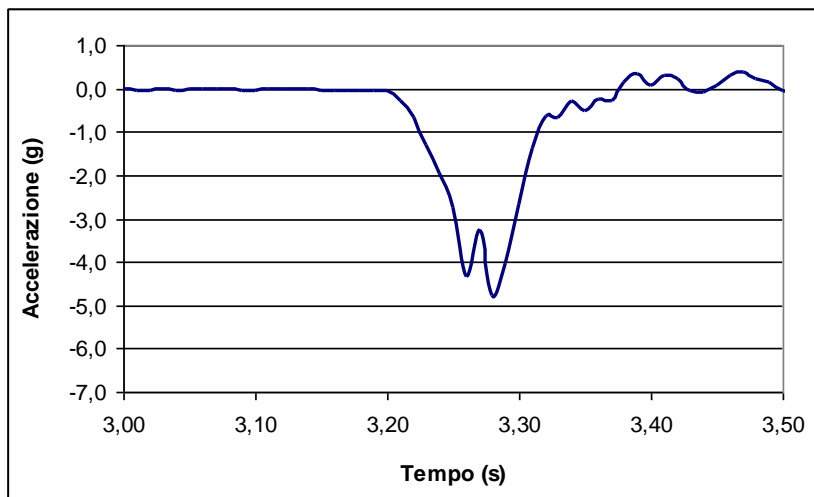


Figura 4.22 - Prova 3, accelerometro UNIFI03, direzione longitudinale (Fiat Punto I).

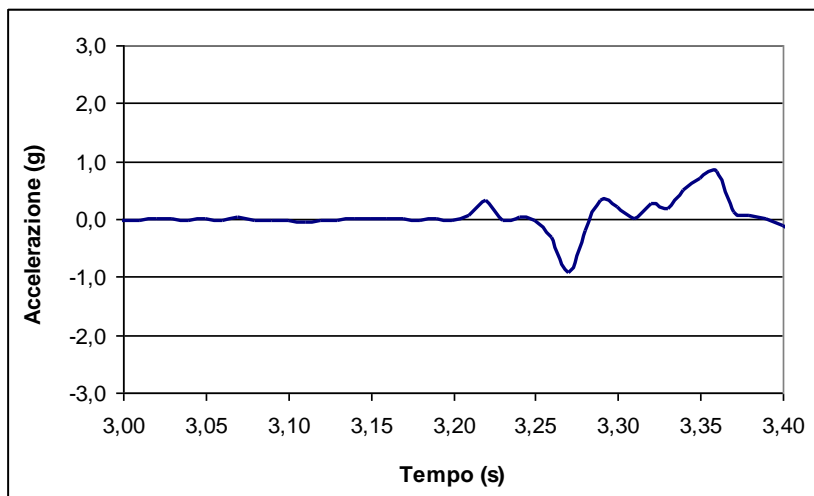


Figura 4.23 - Prova 3, accelerometro UNIFI03, direzione trasversale (Fiat Punto I).

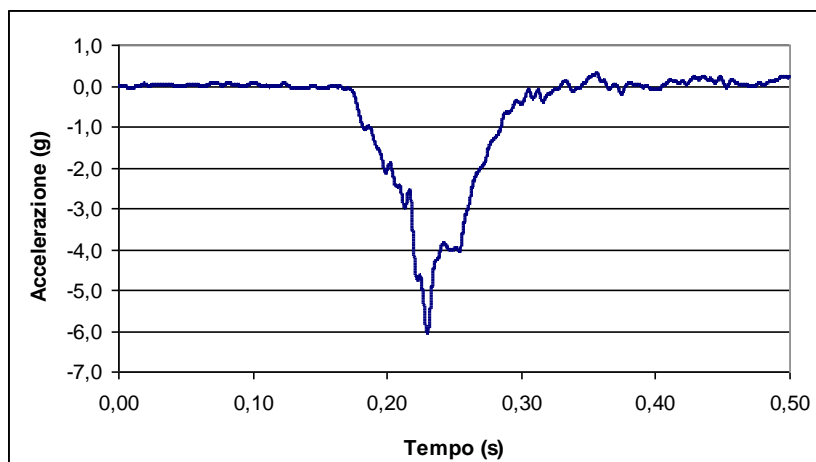


Figura 4.24 - Prova 3, accelerometro di riferimento A, direzione longitudinale (Fiat Punto I).

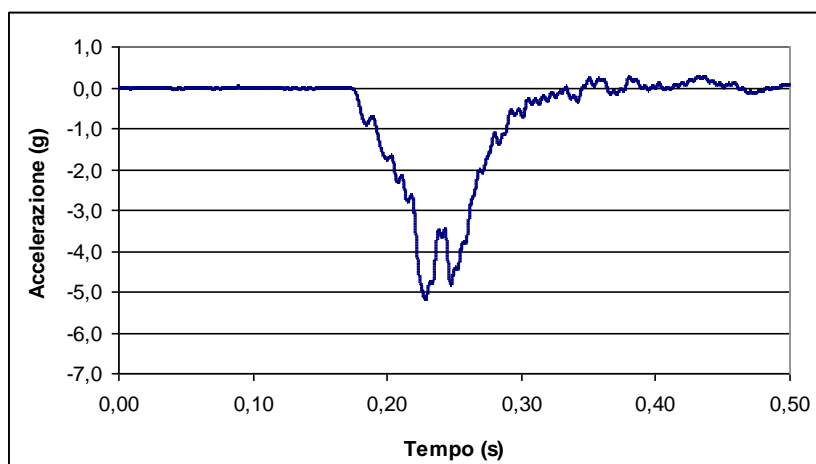


Figura 4.25 - Prova 3, accelerometro di riferimento D, direzione longitudinale (Fiat Punto I).

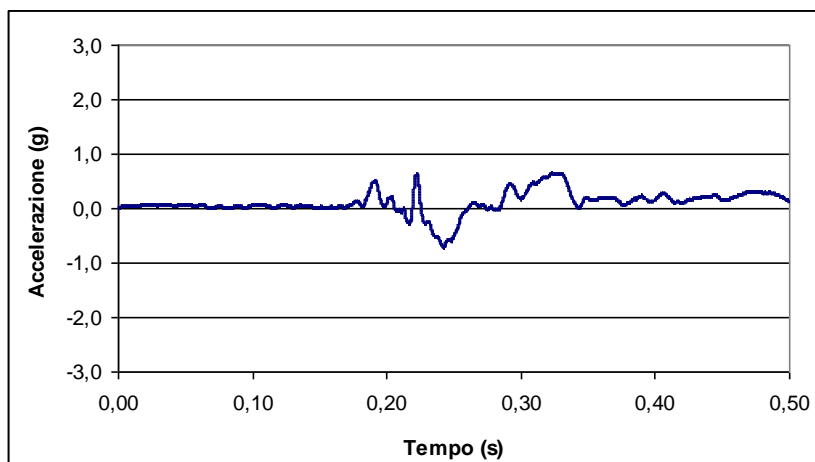


Figura 4.26 - Prova 3, accelerometro di riferimento D, direzione trasversale (Fiat Punto I).

In figura 4.27 si riportano per confronto i valori accelerometrici misurati da tutti gli accelerometri in direzione longitudinale.

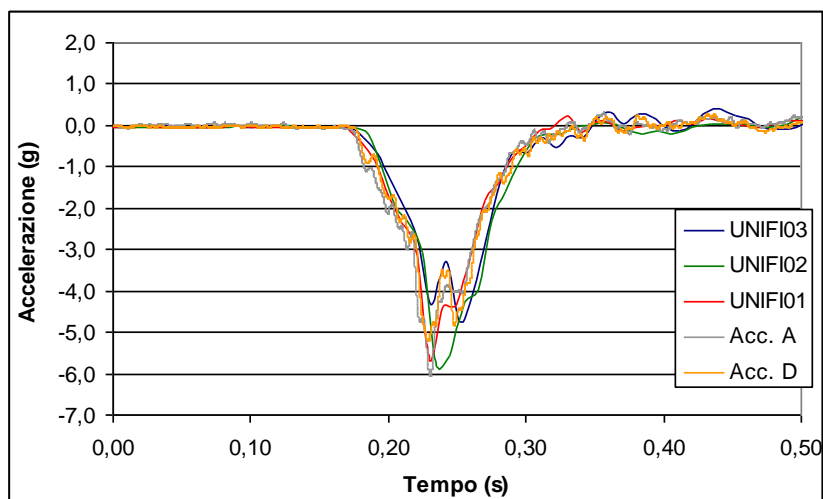


Figura 4.27 - Prova 3, confronto fra accelerometri Clearbox e gli accelerometri di riferimento, direzione longitudinale (Fiat Punto I).

Il confronto tra accelerometri Clearbox e quelli di riferimento è sintetizzato in tabella 4.9:

Tabella 4.9 - Confronto in termini di accelerazioni longitudinali di picco fra accelerometri Clearbox e accelerometri di confronto, Fiat Punto I.

	<b>Accelerometro</b>	<b>Acc. di picco (g)</b>	
<b>Acc. di confronto</b>	A	-6,06	<b>Diff. dalla media degli acc. di confronto</b>
	C	-5,22	
	media	-5,64	
	scarto max	0,42	
<b>Acc. Clearbox</b>	UNIFI01	-5,63	-0,01
	UNIFI02	-5,81	0,17
	UNIFI03	-4,76	-0,88

Dall'analisi dei segnali acquisiti e dalla successiva elaborazione si può osservare che la durata temporale delle accelerazioni rilevate è confrontabile con buona approssimazione con quella degli accelerometri di confronto, sia in direzione longitudinale che trasversale (figure da appendice A). Per quanto riguarda l'ampiezza dei segnali acquisiti relativi alle accelerazioni longitudinali si può osservare (figure 4.28 e 4.29) che per basse accelerazioni di picco (minori di 6g in valore assoluto) la differenza rispetto agli accelerometri di confronto si mantiene sotto 1g (-0,03g in media, con massimo di -0,88g), mentre fra 6g e 12g tale differenza si mantiene inferiore a circa 2g (-0,36g in media, con massimo di -2,21g). Per valori delle accelerazioni più alte di circa 12g è chiaramente visibile un fenomeno di saturazione, trovandosi oltre il campo di funzionamento nominale di tali accelerometri. In figura 4.29 sono mostrati gli scarti rispetto alla media dei valori di picco, sia per gli accelerometri Clearbox che per gli accelerometri di confronto.

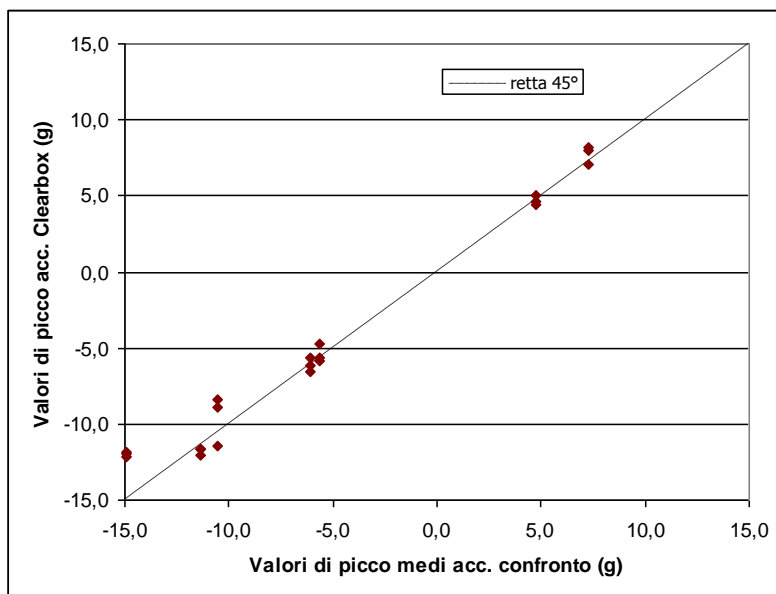


Figura 4.28 - Valori di picco rilevati dagli accelerometri Clearbox in funzione del valore medio delle rilevazioni degli accelerometri di confronto.

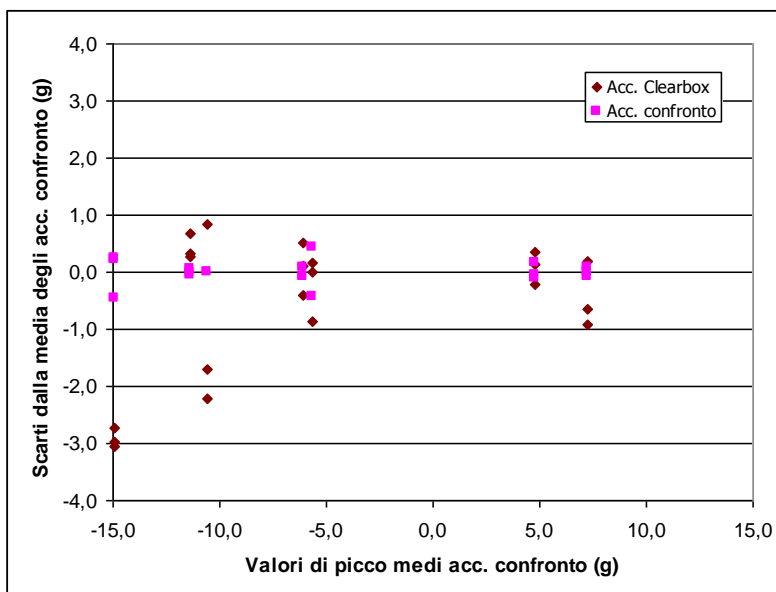


Figura 4.29 - Scarti fra i valori di picco rilevati dagli accelerometri e la media delle rilevazioni degli accelerometri di confronto in funzione della media stessa.

Indipendentemente dall'approccio utilizzato a seconda o meno che sia disponibile il dato proveniente dalla scatola nera, la possibile lesione da colpo di frusta viene valutata confrontando il NIC o altri coefficienti, come ad esempio l'accelerazione massima della testa o del veicolo (figura 4.30), con dei valori di soglia tipicamente determinati mediante test di tamponamento a bassa velocità condotti su volontari.

Accelerazione (G)	< 4	4 < > 15	16 < > 40	> 40
Velocità contro barriera (E. E. S)	< 5 Km/h	8 < > 30 Km/h	30 < > 80 Km/h	> 80 Km/h
Velocità contro altro veicolo di peso equivalente (v. relativa)	8 Km/h	15 < > 45 Km/h	45 < > 105 Km/h	> 105 Km/h
Scala A.I.S.	0	1	≥ 2	≥ 5
Effetti	Assenza di colpo di frusta	Lieve colpo di frusta	Forte colpo di frusta	Colpo di frusta mortale
Durata		Meno di 3 settimane	Mesi o <u>permanente</u>	Morte sul posto
Disturbi	Nessuno	Dolori al collo, alla testa, alla spalla ed al braccio; limitazione dei movimenti, disturbi della deglutizione, disturbi temporanei alla vista, all'udito. Ipoestesia, iperestesia, indurimento dei muscoli	Degenza, insufficienza muscolare, stato depressivo, compromissione dell'equilibrio, nessun intervallo asintomatico, forti dolori durante la deambulazione, disturbi iniziali dello stato di coscienza	Paralisi centrale delle funzioni respiratoria e circolatoria, tetraplegia

Figura 4.30 – Accelerazioni massime in funzione degli effetti lesivi (fonte Cestar Italia 2000).

## **5 Stato di attivazione muscolare durante le prove di tamponamento su volontari**

Numerose ricerche sono state condotte sulla risposta di soggetti coinvolti in impatti ad alta velocità, di contro, relativamente pochi sono i dati circa gli impatti a bassa velocità. Le prime ricerche prevedevano l'uso di cadaveri e manichini Hybrid III. La somiglianza di questi surrogati agli esseri umani è provata, negli impatti ad alta velocità, secondo la letteratura medica ed ingegneristica degli ultimi 4 decenni. La risposta ottenuta nel caso di tamponamenti a bassa velocità, però, non è altrettanto attendibile per vari motivi: i cadaveri mancano chiaramente di risposta muscolare, la quale è un importante contributo alla risposta cinematica. Il manichino Hybrid III è progettato sulla base della risposta dei cadaveri negli impatti ad alta velocità. Come risultato non esistono surrogati in grado di approssimare la risposta umana [50].

La difficoltà se non l'impossibilità di uno studio puntuale relativo al colpo di frusta, favorisce il ricorso ad interpretazioni basate sull'analogia con risultati statistici disponibili in letteratura. È in questo contesto che trovano la loro popolarità metodi basati su indici tra cui il più importante, il NIC (Neck Injury Criterion) che correla il danno al rachide con la velocità ed accelerazioni relative tra testa e collo.

Per ovviare a questo problema, negli ultimi anni sono stati effettuati numerosi studi e campagne di prove sperimentali con test a bassa velocità su volontari, con lo scopo di correlare le accelerazioni subite dal veicolo con le accelerazioni impresse alla testa e quindi con le lesioni lamentate, in modo da individuare un valore di soglia sopra il quale viene percepito il colpo di frusta. Anche se tali studi hanno fatto chiarezza sulla dinamica del colpo di frusta ed hanno fornito un valido aiuto per i tecnici, i risultati sono soggetti a critiche, soprattutto vengono criticati i dati delle prove sperimentali su volontari, in quanto questi,

sapendo di essere sottoposti a test, potrebbero assumere, anche involontariamente, posture o atteggiamenti difensivi, irrigidendo i muscoli della schiena e del collo tali da alterare i risultati delle prove in termini di accelerazione della testa. Ovvero, sono messi in discussione in quanto a tali test non è mai stata affiancata una ricerca che permetta di capire se l'attività muscolare in queste prove possa essere paragonata a quella che solitamente gli stessi soggetti posseggono durante fasi tipiche di guida in cui si concretizzano i reali tamponamenti.

Lo studio innovativo che verrà illustrato in seguito è volto ad individuare una possibile correlazione tra stato di tensione/attivazione muscolare nelle normali condizioni di guida e quelle misurate durante lo svolgimento di prove di tamponamento con volontari eseguite con diverse modalità. A tal fine è stata monitorata l'attività muscolare di alcuni volontari attraverso l'elettromiografia di superficie durante alcune prove di guida e durante test di tamponamento a bassa velocità.

Nel passato l'elettromiografia di superficie (EMG) è stata talvolta usata per comprendere l'attività muscolare durante i test, come in [51] e [52]; o in [53], dove 10 test sono stati svolti su 5 soggetti, maschi e femmine, per confrontare due diversi tipi di poggiatesta. L'uso dell'EMG, insieme ad altre tecniche tradizionali (come gli accelerometri e le riprese video ad alta velocità) può aiutare a comprendere molti aspetti del problema. In [51] l'EMG è stata usata per valutare l'effetto della consapevolezza dei soggetti; in [54] il ruolo della consapevolezza è stato studiato; in [53] sono state adottate alcune precauzioni per assicurarsi che i soggetti fossero inconsapevoli del momento della collisione. In [51] è stato studiato anche l'effetto di test multipli, eseguendo una sequenza di 11 test sullo stesso soggetto.

## 5.1 L'elettromiografia di superficie

L'elettromiografia di superficie o rilevazione mioelettrica di superficie sEMG è quella pratica che permette, con appositi strumenti, di rilevare la corrente prodotta dalla muscolatura e trasmessa sulla superficie della pelle.

L'elettromiografia di superficie rappresenta uno strumento fondamentale per l'analisi e la valutazione del rischio biomeccanico. Durante la propagazione del potenziale all'interno del muscolo, sulla superficie cutanea si determina una distribuzione bidimensionale di cariche che può essere letta dagli elettrodi di superficie. Nei muscoli vi sono dunque delle sorgenti di segnali elettrici che si propagano verso la cute. All'uscita dell'elettromiografo si ottiene un segnale che si modifica nel corso del tempo. Gli elettrodi di superficie vengono posizionati sulla superficie della cute ed il segnale prelevato viene trasferito all'unità centrale.



Con la sEMG si ottiene un tracciato complesso che deriva dall'interferenza dei diversi segnali; si parla, infatti, di tracciato inferenziale.

E' importante ricordare che, avendo il segnale un'ampiezza inversamente proporzionale al quadrato della distanza dalla sorgente, le unità motorie di cui è possibile registrare l'attività sono quelle situate entro un raggio massimo di 15mm dagli elettrodi. Gli elettrodi usati per la registrazione della sEMG sono dei dischi in plastica con al centro un disco metallico con un elettrolita, ricoperti da un gel conduttore per minimizzare l'impedenza di contatto tra la cute e l'elettrodo. Per il sEMG è possibile scegliere tra registrazione di tipo monopolare (un elettrodo attivo in corrispondenza del muscolo da esaminare ed uno di riferimento su un punto neutro) e registrazione bipolare (due elettrodi attivi posti ambedue sul muscolo esaminato). Nel nostro caso è stata usata la registrazione bipolare; questa offre una migliore immunità ai disturbi, benché nel caso di muscoli di piccole dimensioni sia di difficile impiego, essendo meno selettiva di quella monopolare e richiedendo un'area per il posizionamento degli elettrodi maggiore. Il prelievo bipolare mediante un apposito sistema di amplificazione consente di ridurre i disturbi che si presentano in maniera sincrona nella zona di prelievo aumentando il rapporto segnale/rumore. L'elettromiografia di superficie non è invasiva ed il soggetto dal quale si registra può eseguire la naturale attività motoria. Abbiamo quindi la possibilità di registrare l'attività elettromiografica durante le fasi di guida ed i test di tamponamento in modo da valutare il livello di tensione/attivazione muscolare. Il segnale EMG deve essere innanzitutto filtrato, in modo da eliminare disturbi o metterne in evidenza le componenti d'interesse. Le tipologie di filtraggio sono diverse, a seconda che si vogliano evidenziare componenti a bassa frequenza (filtro passa-basso) o ad alta frequenza (filtro passa-alto) presenti nel segnale, che si vogliano eliminare componenti di disturbo a frequenza prefissata (notch-filter) o di caratteristiche note e variabili nel tempo (filtraggio tempo-variante). Il segnale viene quindi filtrato, in modo tale da trasformare un'informazione complessa in un dato di semplice interpretazione. Quando andiamo ad analizzare vari segnali elettromiografici, anche se questi sono stati prelevati in momenti diversi dallo stesso soggetto o se sono stati registrati in soggetti diversi, è necessario introdurre una procedura di normalizzazione, si deve cioè adottare un riferimento ("stato rilassato") in modo che i segnali siano tra loro confrontabili.

## 5.2 Test su volontari: materiali e metodi

Per individuare una possibile correlazione tra stato di tensione/attivazione muscolare nelle normali condizioni di guida e quelle misurate durante lo svolgimento di prove di tamponamento è stata condotta una

sperimentazione su volontari. In particolare a 9 partecipanti, 2 femmine e 7 maschi (tabella 5.1), è stato richiesto di effettuare una guida di un autoveicolo in ambito cittadino e conseguentemente di sottoporsi a dei tamponamenti a bassa velocità. In entrambe le prove ai soggetti veniva monitorata l'attività muscolare mediante elettromiografia di superficie. Tutti i volontari hanno dichiarato di non avere mai avuto lesioni causate da colpo di frusta né patologie legate all'apparato muscolare o scheletrico. L'età dei partecipanti varia fra 26 e 68 anni, l'altezza fra 165 e 183 cm, il peso fra 56 e 100 kg.

Tabella 5.1 – Volontari che hanno partecipato alla sperimentazione.

ID volontario	Sesso	Età	Altezza (cm)	Peso (kg)
A	F	26	168	56
B	F	32	165	56
C	M	56	183	92
D	M	33	174	66
E	M	28	180	76
F	M	29	180	72
G	M	48	173	74
H	M	68	169	76
I	M	29	176	100

Nei test effettuati sono state monitorate 5 coppie di muscoli in modalità differenziale (2 elettrodi per ciascun muscolo), scelti fra quelli coinvolti nel meccanismo del colpo di frusta, e alcuni muscoli delle braccia e delle spalle, per valutare l'entità della presa sul volante. Nel dettaglio sono stati monitorati: lo splenio, il trapezio, lo sternocleidomastoideo, il deltoide ed il flessore (figura 5.1).

Nel seguito della trattazione i cinque muscoli appena citati saranno così identificati per comodità:

- Splenio: SPL sx e SPL dx;
- Trapezio: TRAP sx e TRAP dx;
- Sternocleidomastoideo: SCM sx e SCM dx;
- Deltoide: DEL sx e DEL dx;
- Flessore: FLE sx e FLE dx.

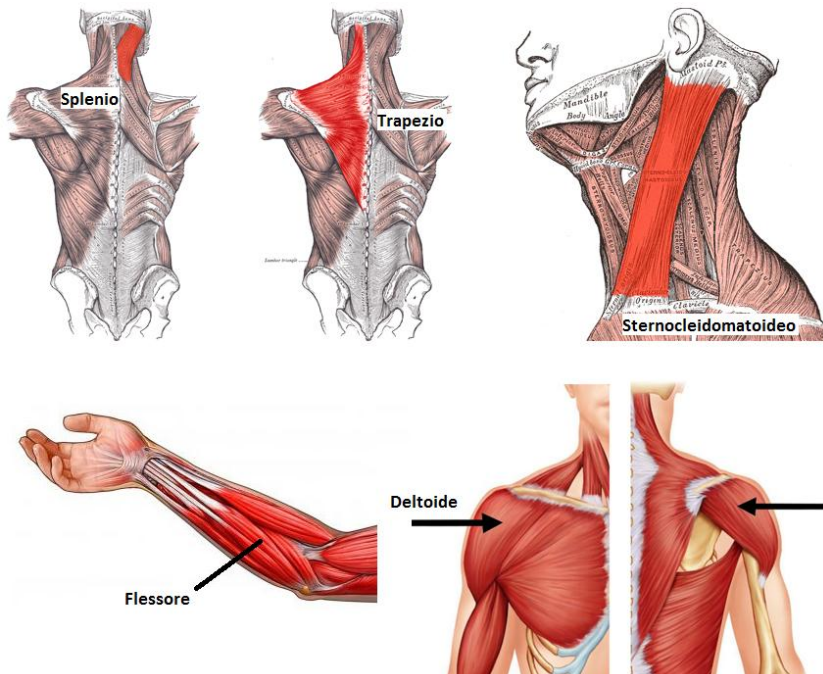


Figura 5.1 – Muscoli monitorati con l'elettromiografia di superficie.

### 5.2.1 Prove di guida

La prima campagna di prove svolta ha previsto una attività di prove su strada per analizzare il livello di tensione/attivazione muscolare durante le varie fasi di guida (frenata decisa, attesa al semaforo, influenza di suoni/rumori o eventi di pericolo, ecc...) attraverso test su volontari. Per le prove è stato utilizzato l'autoveicolo Renault Clio II 1.2 16V. Questo è stato equipaggiato con due telecamere, una con inquadratura del soggetto sincronizzata con l'acquisizione dell'elettromiografo, l'altra con inquadratura sullo scenario esterno. E' stato installato un sistema GPS (Qstarz modello BT-1000EX) al fine di rilevare velocità e posizione del veicolo istante per istante durante l'intera prova.

Durante le prove i soggetti sono stati monitorati attraverso elettromiografia di superficie per valutare il livello di tensione/attivazione muscolare durante la guida. I segnali EMG sono stati acquisiti da un PC portatile alla frequenza di 1024 campioni al secondo; è stato poi registrato un video frontale in sincronia, per correlare il segnale EMG con i movimenti del soggetto.

Prima che il soggetto iniziasse la prova è stato informato sul percorso che doveva percorrere e sui comandi che doveva seguire durante la guida. Ai soggetti non veniva imposto di guidare con entrambe le mani sul volante, ma al contrario, di mantenere la posizione che abitualmente mantengono alla guida del proprio veicolo.

I 24 elettrodi necessari per monitorare l'attività muscolare dei 5 muscoli prima detti, sono stati installati da un tecnico che li ha posizionati seguendo raccomandazioni europee del progetto SENIAM (Surface EMG for Non-Invasive Assessment of Muscle).

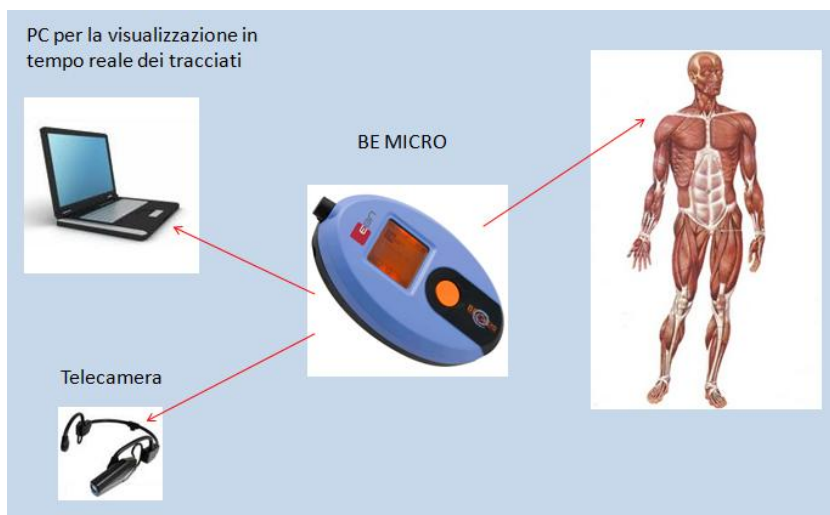


Figura 5.2 – Strumentazione per l'acquisizione dell'attività muscolare mediante EMG.

Sono state identificate e monitorate 7 condizioni di guida rappresentative delle condizioni standard in ambiente cittadino:

- Guida normale (guida nel traffico cittadino in assenza di particolari frenate o curve);
- Attesa al semaforo;
- Frenata;
- Frenata decisa;
- Curva a destra;
- Curva a sinistra;
- Velocità superiore a 70 km/h.

Al fine di standardizzare le prove è stato proposto lo stesso percorso di guida per ogni volontario. Il percorso, visualizzato in figura 5.3, è di tipo cittadino





Figura 5.4 – BE-Micro.

Al PC è stata interfacciata una telecamera, con registrazione sincronizzata all'acquisizione dell'elettromiografo, che inquadrava il conducente durante la guida, in modo da esaminare la posizione della testa. Per mezzo del software Galileo di Eb-Neuro è stato possibile visionare le registrazioni di ogni prova ed individuare le attività muscolari nelle diverse fasi di guida mediante l'analisi del tracciato elettromiografico (figura 5.5).

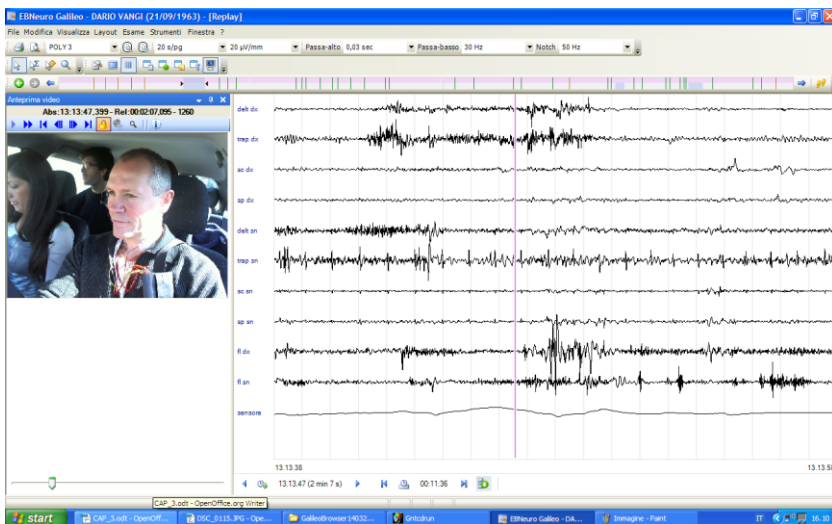


Figura 5.5 - Layout del software Galileo.

### 5.2.2 Prove di tamponamento

In una seconda fase sono stati effettuati test di tamponamento a bassa velocità (corrispondenti o inferiori al livello di sollecitazione comunemente associato al rischio di lesione, la soglia di rischio non viene mai raggiunta né superata) con i medesimi volontari in diverse condizioni di attenzione, monitorando lo stato di tensione/attivazione muscolare e le accelerazioni subite dal veicolo e dalla testa. Questi ultimi parametri sono stati utilizzati come strumenti di controllo sulla severità dell'impatto. La velocità del veicolo tamponante è compresa tra 6 e 8 km/h con veicolo tamponato fermo. Da una revisione della letteratura sembra che per un occupante sano, adulto, seduto normalmente, con un adeguato supporto poggiatesta, un cambiamento di velocità di 8 km/h o meno non esponga a nessun tipo di rischio significativo di lesione. In particolare secondo Schmidt [55] si avrebbe assenza di colpo di frusta nel caso in cui l'accelerazione è inferiore a 4g, se l'EES (Energy Equivalent Speed) è minore di 5 km/h, o se il  $\Delta v$  nell'urto con un veicolo di massa equivalente è minore di 8 km/h. Risultati analoghi sono stati trovati da McConnell [56].

I test svolti hanno lo scopo di includere gli impatti che si avvicinano, ma non superano, la variazione di velocità di 8 km/h per il veicolo tamponato.

Le prove di tamponamento sono state condotte presso la pista del LaSIS (Laboratorio per la Sicurezza e Infortunistica Stradale) dell'Università di Firenze. L'attività è stata supportata, così come per le prove di guida, dal Dipartimento di Scienze Chirurgiche Specialistiche dell'Università di Firenze, che ha messo a disposizione un medico per il monitoraggio e l'elaborazione dei dati dell'elettromiografo e un tecnico di laboratorio per l'applicazione dei relativi elettrodi. La strumentazione necessaria per l'analisi dello stato di attivazione/tensione muscolare (elettromiografo) è stata messa a disposizione, così come per le prove di guida, da EB-Neuro di Firenze, che da anni sviluppa, realizza e commercializza apparecchiature elettromedicali.

L'urto a bassa velocità, è uno degli incidenti più comuni nell'ambito del traffico urbano. I casi più frequenti di tamponamento si verificano quando un'auto si dirige contro un'altra vettura ferma nel traffico (per incolonnamento, semaforo, passaggio pedonale, ecc.) o in frenata, senza frenare in tempo. Per simulare i casi reali di tamponamento, nei crash test effettuati, sono state adottate due configurazioni: teso mani sul volante e rilassato mani sul volante. Per simulare il tamponamento in caso di guidatore consapevole, è stata adottata la configurazione teso mani sul volante (TMSV). In questo caso è stata riprodotta la situazione in cui il guidatore, in frenata o fermo nel traffico, guardando nello specchietto retrovisore e sentendo il rumore, percepisce l'arrivo della vettura tamponante. Il guidatore, supposto con le mani sul volante, si irrigidisce istintivamente nel tentativo di

assumere una posizione preventiva. Di contro, per simulare il caso in cui il guidatore sia ignaro del sopraggiungere della vettura tamponante, è stata adottata la configurazione rilassato mani sul volante (RMSV). In questo caso è stato voluto riprodurre la situazione di guidatore fermo nel traffico o in frenata, nella condizione in cui non si accorge del sopraggiungere della vettura. Le mani sono sempre supposte sul volante, ma con muscolatura rilassata. Il soggetto, in questo caso, non adotta una misura preventiva, ma reagisce dopo l'urto.

Nelle prove di tamponamento condotte, il veicolo tamponato è fermo, in folle e con i freni completamente rilasciati prima dell'impatto. Un volontario per ciascuna prova è stato fatto sedere sul sedile anteriore al posto di guida in posizione rilassata, la stessa che è solito assumere nella propria auto; a tal fine è stato chiesto ai volontari di regolare specchietti e schienale come più preferivano. L'impatto avveniva paraurti contro paraurti: il paraurti posteriore del veicolo tamponato veniva colpito dal paraurti anteriore del veicolo tamponante con 100% di overlap: veicoli perfettamente allineati.

Il veicolo tamponante è stato azionato dal sistema di lancio utilizzato per le prove con i motoveicoli: due elastici in parallelo (Sandow Technic modello Avia) (figura 5.6) messi in tensione da un verricello (Ramsey modello Rep 8000), vengono collegati all'auto mediante un gancio (figura 5.7). Disponendo l'auto tamponante ad una distanza prestabilita è stata determinata la maggiore o minore tensione dell'elastico e quindi la velocità d'urto, consentendo al veicolo tamponante, una volta rimosso il gancio, di muoversi in avanti coprendo una distanza predeterminata al punto di impatto. La velocità di impatto è stata prestabilita per ogni prova.



Figura 5.6 – Campo prove di crash test di Sesto Fiorentino: elastico impiegato per azionare il veicolo tamponante collegato ad un estremo ad una barra in acciaio solidale al terreno e dall'altro, mediante cavo di acciaio, alla parte frontale del veicolo da movimentare.





Figura 5.7 – Dettaglio sul gancio posto nella parte posteriore del veicolo da movimentare (veicolo tamponante). Il cavo in acciaio, recuperato da un verricello elettrico, traina in dietro l'auto mettendo in trazione gli elastici.

Il veicolo tamponato sul quale venivano accomodati i volontari, era una Fiat Punto 1° serie 3 porte. Prima dell'inizio del test, il paraurti è stato esaminato ed è risultato in buono stato senza evidenza di danno. La portiera laterale del conducente è stata rimossa prima dell'inizio delle prove per facilitare l'osservazione e videoregistrazione dei volontari. Il sedile anteriore è dotato di poggiatesta e cintura di sicurezza regolabili. Il veicolo tamponante era una Opel Corsa 2° serie 3 porte. Gli stessi due veicoli sono stati usati ripetutamente per tutte le prove senza riparazioni o modifiche tra una prova e l'altra (figura 5.8).



Figura 5.8 – Vista dall’alto del campo prove: in primo piano il veicolo tamponato (Fiat Punto) e in secondo il veicolo tamponante (Opel Corsa).

Il veicolo tamponato era equipaggiato con un accelerometro installato in prossimità del centro di massa (Dytran modello 7521A6, fondo scala 100g) (figura 5.9). La velocità di impatto del veicolo tamponante è stata misurata usando una pistola radar (Stalker Pro modello Ats) e da un sistema a fotocellule laser (Age Scientific) (figura 5.10). Ogni test è stato registrato con una video camera ad alta velocità (Fastec Inline, 250 fps, B/W), puntata sul veicolo tamponato e sul soggetto (figura 5.11). Per permettere misurazioni attraverso il filmato sono stati posizionati

alcuni target per video: uno sul centro della testa del soggetto, e 4 sul veicolo, a distanza nota, da usare come riferimento. Oltre agli elettrodi EMG, (con la stessa configurazione usata nei test di guida) i volontari sono stati strumentati per mezzo di due accelerometri, fissati su un leggero casco di plastica (figura 5.12): uno triassiale (Crossbow modello CXL25GP3, fondo scala 25 g), montato sulla sommità della testa, ed uno monoassiale (Dytran modello 7521A6, fondo scala 100 g), fissato sulla fronte. I segnali degli accelerometri sono stati acquisiti da un PC portatile alla frequenza di 1024 Hz e sincronizzati col video ad alta velocità per mezzo di un segnale di trigger.



Figura 5.9 - Accelerometro installato in prossimità del centro di massa del veicolo tamponato.



Figura 5.10 – Sistema di fotocellule per il rilievo della velocità di tamponamento della macchina tamponante.



Figura 5.11 – Posizionamento della telecamera ad alta velocità.



Figura 5.12 - Leggero casco di plastica strumentato.



Al fine di standardizzare le prove per simulare condizioni reali, in cui l'occupante sia o meno a conoscenza dell'impatto, sono state utilizzate le due modalità di prova precedentemente descritte: teso mani sul volante e rilassato mani sul volante. Nella prima configurazione il volontario, posizionato al posto di guida con entrambe le mani sul volante, guardando nello specchietto retrovisore e sentendo il rumore dell'auto che sopraggiungeva, era a conoscenza del momento dell'impatto (figura 5.13). Nella seconda configurazione il volontario assumeva la stessa posizione, solo che per evitare che percepisse il momento dell'impatto indossava cuffie con musica ad alto volume e gli specchietti retrovisori erano oscurati (figura 5.14). Inoltre, per evitare che il soggetto si rendesse conto che la prova stava per avere inizio, in questa configurazione veniva oscurato anche il parabrezza e il tempo di attesa fra i test era fatto variare in maniera casuale.

Ogni soggetto è stato sottoposto a due tamponamenti per ogni configurazione: il primo ad una velocità di circa 6 km/h ed il secondo a circa 8km/h. Sono state effettuate 4 prove per ogni volontario, per un totale di 36 tamponamenti, con pause di alcuni minuti (solitamente la sequenza dei test è stata TMSV6, TMSV8, RMSV6, RMSV8, tabelle 5.2). L'accelerazione di picco e la variazione di velocità ( $\Delta v$ ), mostrate in tabella 5.2, sono state ottenute dall'accelerometro installato sul veicolo tamponato, mentre la velocità d'impatto è stata misurata con la pistola radar o col sistema a fotocellule.



Figura 5.13 – Prova con soggetto consapevole dell'impatto: TMSV.



Figura 5.14 - Prova con soggetto non consapevole dell'impatto: RMSV.

Tabella 5.2 – Prove di tamponamento su volontari condotte.

ID test	ID volontario	Tipologia test	Velocità impatto (km/h)	$\Delta V$ (km/h)	Acc. picco (g)
01	A	TMSV	6,6	3,5	1,8
02	A	TMSV	8,4	6,2	4,0
03	A	RMSV	6,0	4,5	2,2
04	A	RMSV	7,7	6,1	4,3
05	B	TMSV	6*	4,8	2,8
06	B	TMSV	8,2	7,2	4,6
07	B	RMSV	7,4	5,8	3,6
08	B	RMSV	8,4	6,8	5,3
09	H	TMSV	8*	6,1	3,7
10	H	TMSV	6*	5,5	3,0
11	H	RMSV	6*	5,1	2,8
12	H	RMSV	8*	6,3	4,5
13	G	TMSV	5,7	4,9	2,6
14	G	TMSV	7,5	6,2	3,8
15	G	RMSV	5,8	4,8	2,4
16	G	RMSV	7,4	6,2	3,9
17	C	TMSV	5,5	4,6	2,3

ID test	ID volontario	Tipologia test	Velocità impatto (km/h)	$\Delta V$ (km/h)	Acc. picco (g)
18	C	TMSV	7,2	6,0	3,8
19	C	RMSV	7,3	5,9	4,1
20	C	RMSV	5,8	5,0	2,5
21	E	TMSV	6,1	5,8	2,9
22	E	TMSV	7,9	7,0	4,5
23	E	RMSV	6,1	5,0	3,0
24	E	RMSV	7,9	6,5	4,4
25	F	TMSV	6,8	5,3	3,3
26	F	TMSV	7,8	6,4	4,3
27	F	RMSV	7,8	6,6	5,1
28	F	RMSV	6,6	6,3	3,5
29	D	TMSV	6*	4,6	2,8
30	D	TMSV	8,0	n.a.	n.a.
31	D	RMSV	6,1	5,2	2,7
32	D	RMSV	7,9	6,5	4,9
33	I	TMSV	5,9	4,7	2,6
34	I	TMSV	7,7	6,3	4,5
35	I	RMSV	8,0	6,6	5,5
36	I	RMSV	6,3	n.a.	n.a.

### 5.3 Analisi dei dati dei test su volontari

In prima battuta è stato valutato il livello di attivazione muscolare nelle diverse fasi di guida. L'elaborazione del segnale elettromiografico si rende necessaria in quanto i dati in uscita (visualizzabili con il software Galileo) dalle varie prove, non si presentano sotto forma numerica, ma sotto forma di segnale (vedi figura 5.15, attività trapezio) caratteristico dell'attività muscolare. Il segnale varia nel tempo a seconda di numerosi fattori: soggettivi (posizione di guida, tensione,...) e ambientali (stato del fondo stradale, rumore,...). Il segnale, opportunamente trasformato in formato ASCII, viene analizzato mediante un programma scritto in linguaggio LabVIEW, il quale fornisce come output valori numerici che a questo punto diventano rappresentativi e confrontabili tra i vari soggetti. Per l'analisi relativa al livello di attivazione muscolare, sia durante la guida normale che durante i crash test, è stato utilizzato il software Galileo di EB-Neuro, con il quale è stato possibile visionare le registrazioni di ogni prova ed individuare le tempistiche relative a ciascun evento di guida. Dallo stesso software è stato possibile calcolare

la durata dell'evento, ed individuare lo stato rilassato del soggetto, cioè lo stato con la minore attivazione muscolare (figura 5.16), da usare come riferimento nell'analisi numerica.

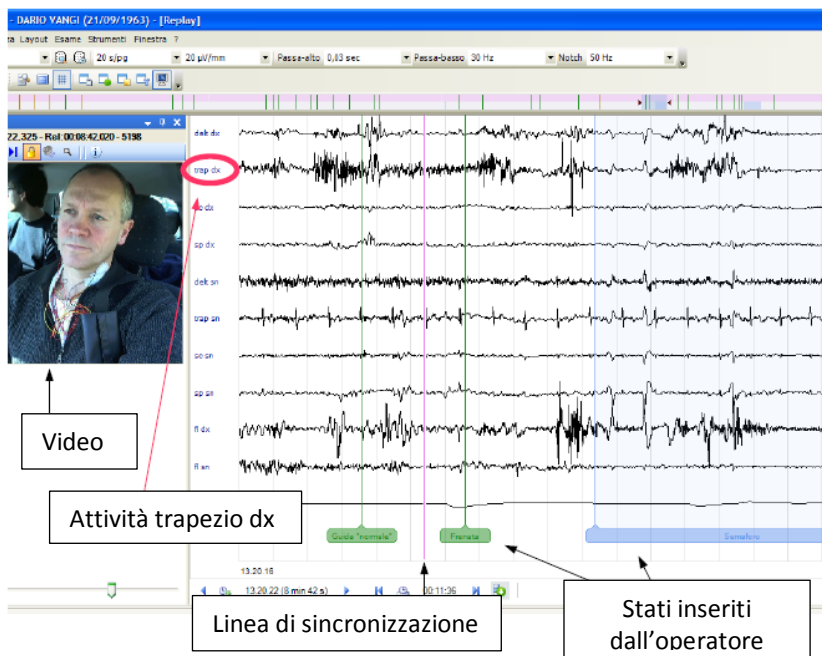


Figura 5.15 – Layout del software Galileo.

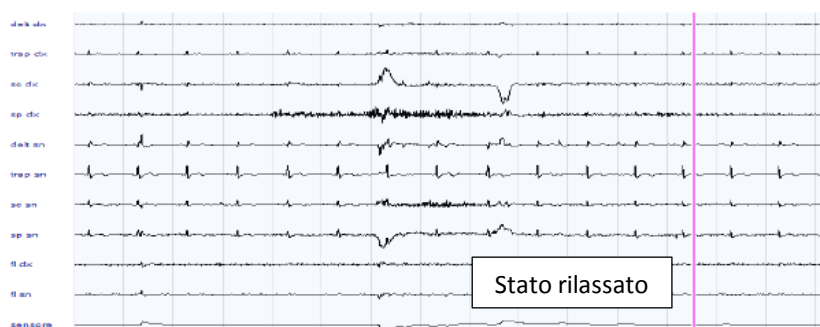


Figura 5.16 – Attivazione muscolare: la banda viola verticale rappresenta un istante in cui il volontario è rilassato.



La schermata del software Galileo, si presenta come in figura 6.1. Sulla sinistra dello schermo è possibile vedere la ripresa video sincronizzata con l'acquisizione dell'elettromiografo. A destra del video si dispone dell'elenco completo dei muscoli analizzati e della rispettiva attività muscolare. La linea di sincronizzazione indica l'istante che stiamo analizzando ed in basso è possibile leggere il tempo (in minuti) corrispondente. E' inoltre possibile visionare gli eventuali commenti ed annotazioni posti dall'operatore durante il test.

Per le prove di guida, mediante la visione dell'attività muscolare, congiuntamente al video sincronizzato ed alla ripresa sullo scenario esterno, è possibile definire i vari stati di guida e quello rilassato da tenere come riferimento.

Le tempistiche relative agli stati di guida (curva a destra, curva a sinistra, frenata, attesa al semaforo, guida normale, velocità maggiore di 70 km/h e frenata decisa), trasformate in secondi, sono state analizzate per mezzo di un programma appositamente scritto in linguaggio "Lab-VIEW" (NATIONAL INSTRUMENTS, 2009). Il programma prevede, una volta impostato il tracciato elettromiografico del paziente, trasformato in formato ASCII, di impostare da un lato lo stato rilassato (in secondi) che rappresenta il riferimento del soggetto per tutta l'analisi dello stato di tensione durante la guida, e dall'altro la tempistica (sempre espressa in secondi) dell'evento specifico di cui si vuole fare l'analisi. Per entrambi gli eventi è necessario impostare la durata. Il software così formulato calcola la media aritmetica (coincidente con la media integrale) dell'intervallo impostato (composto da n punti finiti) sia per lo stato rilassato che per l'evento specifico. Come output fornisce il rapporto tra il livello di attivazione muscolare dello stato prescelto e quello di riferimento (figura 5.17): in tal modo si ottengono numeri adimensionali che tengono conto delle inevitabili differenze fisiologiche e quelle dovute alla posizione e alle condizioni di accoppiamento degli elettrodi.

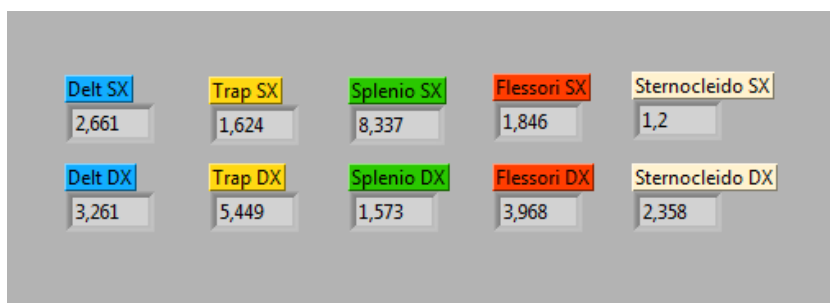


Figura 5.17 – Pannello dei risultati in LabView.

Il programma inoltre permette di visualizzare l'attività muscolare sia dello stato rilassato che dello stato in esame per ciascun muscolo monitorato (figura 5.18).

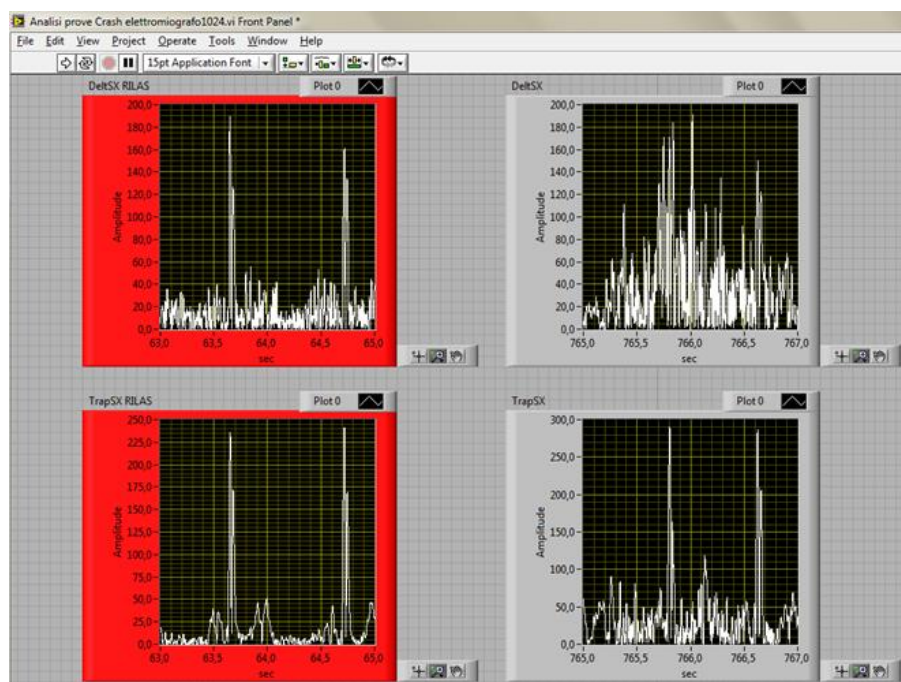


Figura 5.18 – Segnali di due muscoli differenti: in rosso lo stato rilassato, in grigio lo stato di attivazione in esame.

Il lavoro, per le prove di guida, si è esteso alla rilevazione, mediante l'analisi dei dati forniti dal GPS, delle velocità effettive nei vari istanti di guida; in particolare l'attenzione si è concentrata sulle fasi di curva a destra e curva a sinistra, allo scopo di verificare un'eventuale correlazione con l'attività muscolare (figura 5.19). Il GPS è stato installato sulla macchina utilizzata per effettuare i test di verifica di attivazione muscolare durante la guida normale.

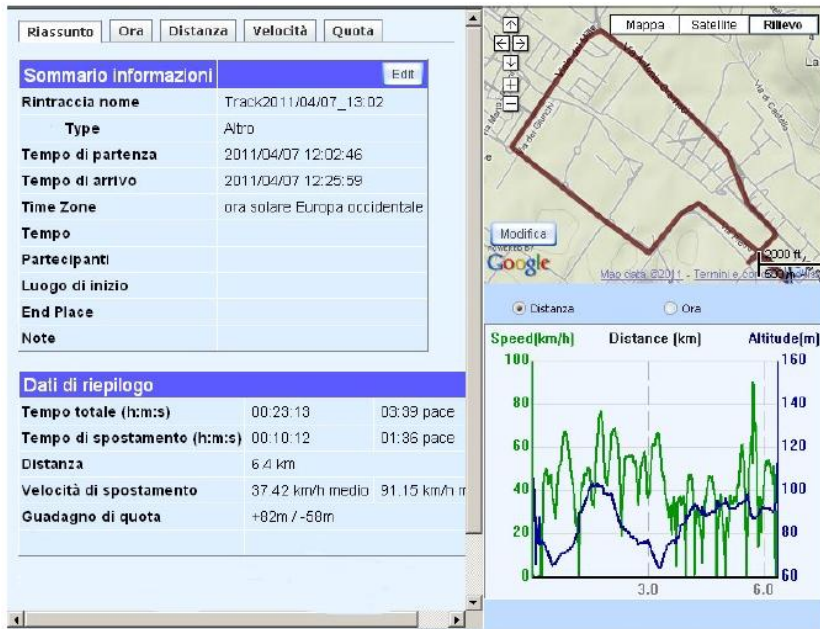


Figura 5.19 - Interfaccia grafica QStarz PC Suite.

La velocità di guida è stata calcolata come la media tra due istanti successivi, in quanto l'acquisizione del GPS era stata impostata in modo tale da acquisire 5 punti in un secondo. Da questa analisi si sono correlate le velocità con gli istanti in cui si sono concretizzati gli eventi.

Per i test di tamponamento i segnali elettromiografici sono stati acquisiti ed elaborati nella stessa maniera dei test di guida. In particolare per queste prove si è analizzata l'attivazione muscolare nella fase di pre-urto.

Infine, per le prove di tamponamento, sono stati analizzati i video ad alta velocità, per verificare eventuali anomalie di comportamento durante le prove e per effettuare un'analisi degli spostamenti della testa (figura 5.20).

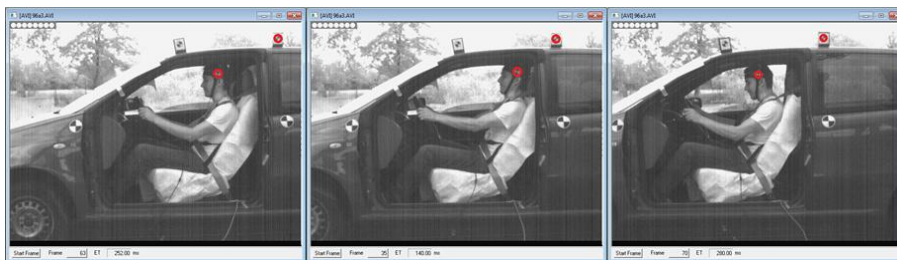


Figura 5.20 – Immagini estratte dal video ad alta velocità per analisi del comportamento dell'occupante durante il tamponamento.

## 5.4 Discussione delle prove di guida

### 5.4.1 Intensità dell'attivazione muscolare durante la guida

I segnali elettromiografici normalizzati, ottenuti dividendo per un valore medio acquisito da un segnale di riferimento (uno per ogni soggetto e per ogni test), vengono a questo punto analizzati e discussi.

Per ciascun soggetto è stata diagrammata l'intensità di attivazione di ciascun muscolo monitorato in funzione della fase di guida analizzata. In figura 5.21 e 5.22 si riportano gli stati di attivazione muscolare del soggetto ID H in due differenti condizioni di guida: guida normale e frenata.

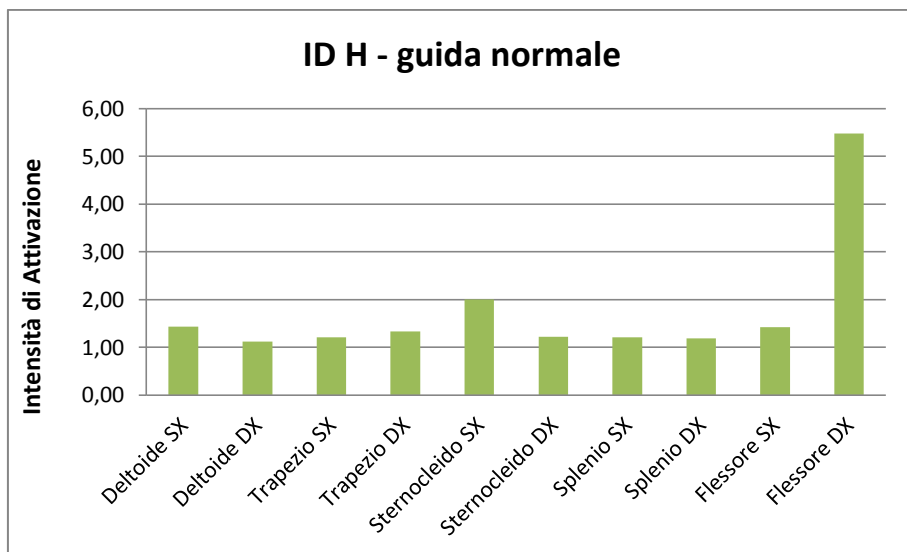


Figura 5.21 – Attivazione muscolare media normalizzata del volontario ID H durante la guida normale.

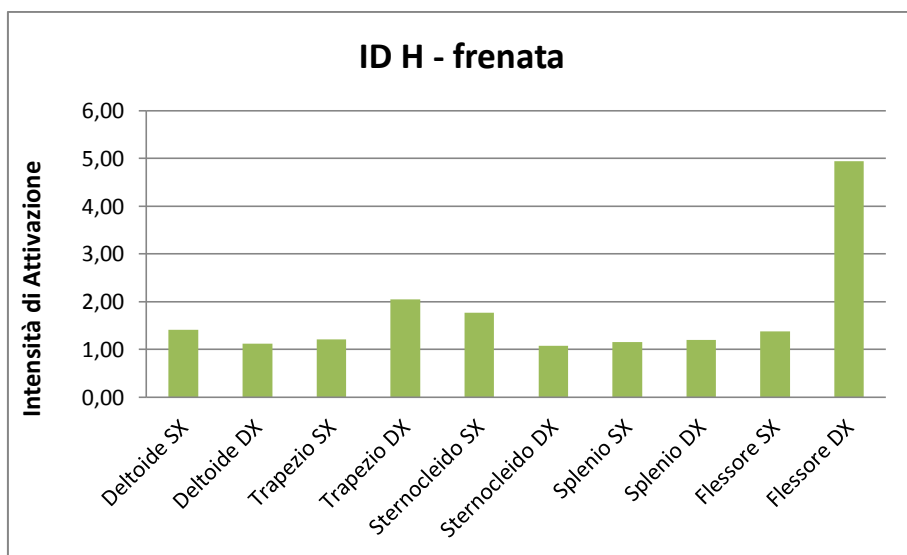


Figura 5.22 - Attivazione muscolare media normalizzata del volontario ID H durante la frenata.

Alla luce dei risultati ottenuti, delle 7 fasi individuate precedentemente (guida normale, attesa al semaforo, frenata, frenata decisa, curva a destra, curva a sinistra, velocità superiore ai 70 km/h), si è deciso di studiare nel dettaglio solamente 3 fasi, ovvero:

- frenata decisa;
- guida normale;
- attesa al semaforo.

Queste sono quelle nelle quali sono state individuate delle nette differenze di attivazione muscolare. Le altre condizioni di guida possono ricondursi, per il livello di attivazione muscolare, in una delle tre studiate.

Di seguito si riporta a titolo di esempio l'attivazione muscolare del soggetto ID G nelle tre fasi di guida appena citate (in appendice B viene riportato per ogni soggetto lo stato di attivazione muscolare nelle tre fasi di guida identificate).

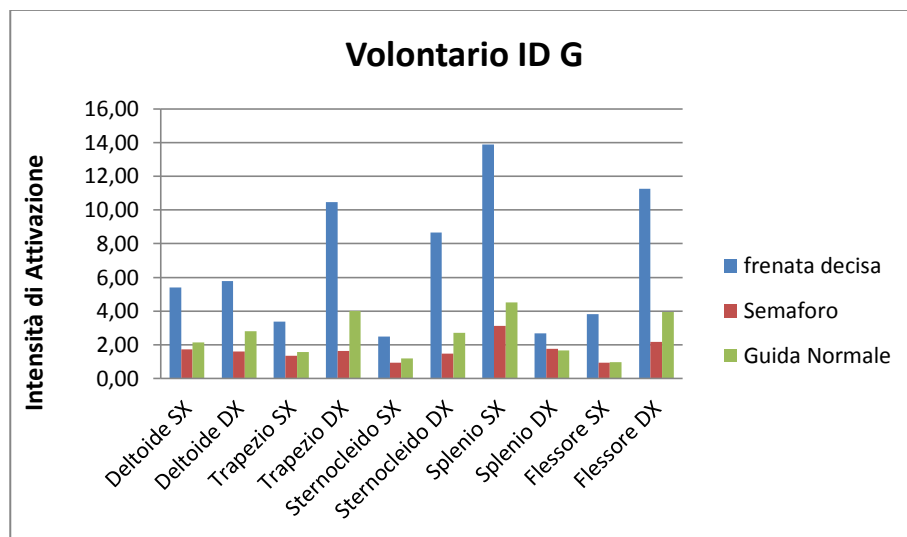


Figura 5.23 – Attivazione muscolare normalizzata media del volontario ID G.

In figura 5.24 è mostrato, per ciascun volontario, lo stato di attivazione muscolare, calcolato come media dei soli muscoli del collo (trapezio, sternocleidomastoideo, splenio), nelle tre diverse fasi di guida: frenata decisa, guida normale e attesa al semaforo. Come si può vedere, c'è una marcata per tutti i soggetti nell'attivazione muscolare relativa a specifiche fasi di guida, con l'attesa al semaforo che solitamente comporta i valori più bassi, mentre durante la frenata

violenta (che simula la frenata di emergenza) si sono registrati i valori più alti. Più in dettaglio, la frenata violenta ha comportato valori EMG statisticamente più alti per 5 muscoli su 6; mentre l'attesa al semaforo ha prodotto una attivazione più bassa della guida normale, per 3 muscoli su 6.

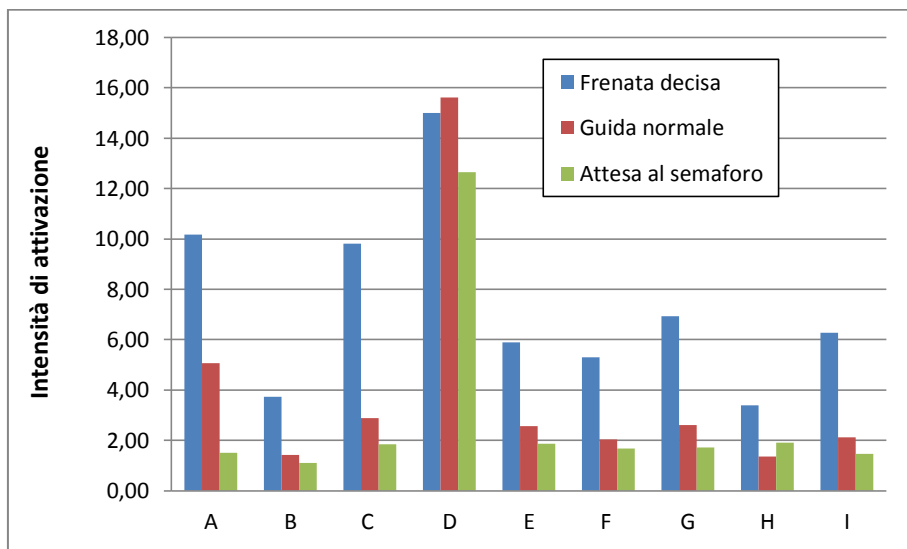


Figura 5.24 - Attivazione muscolare normalizzata, calcolata come media dei soli muscoli del collo, per ciascun soggetto.

Una condizione molto particolare si riscontra nel soggetto D il quale presenta un'alta attivazione muscolare indipendentemente dalla fase di guida nella quale si stia trovando.

Effettuando per ogni soggetto il rapporto, della media dello stato di attivazione muscolare dei soli muscoli del collo, tra la frenata decisa e la guida normale in rettilineo, è possibile osservare come l'attivazione muscolare nella situazione che simula la frenata di emergenza sia mediamente 2,6 volte quella che ciascun soggetto possiede normalmente durante la guida standard (escludendo il soggetto D).

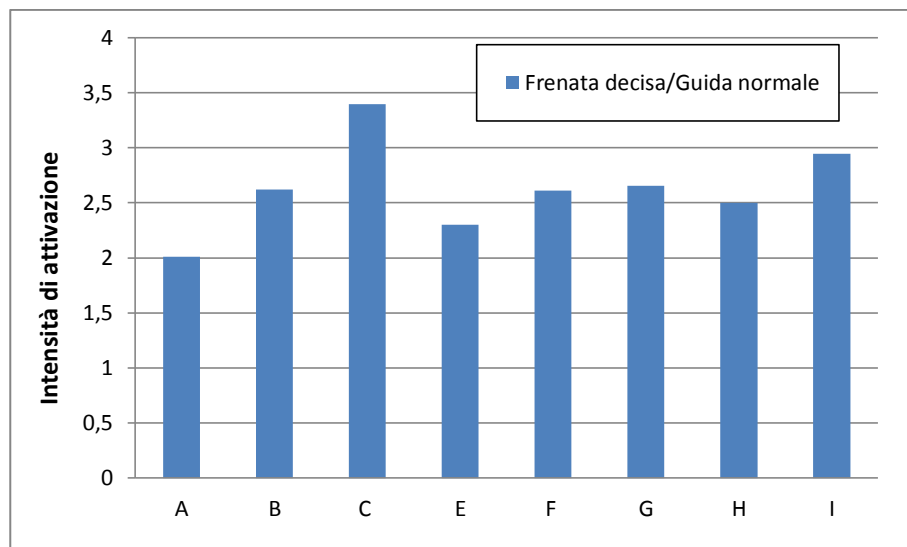


Figura 5.25 – Rapporto tra lo stato di attivazione muscolare nella frenata decisa e quello nella guida normale per ciascun soggetto (escluso il volontario ID D).

#### 5.4.2 Confronto tra la velocità del veicolo e lo stato di attivazione muscolare

Dall'analisi dei dati del GPS è stata cercata un'eventuale correlazione tra la velocità di guida e l'attivazione muscolare. Sono state analizzate solo le velocità nei casi di curva a destra ed a sinistra per una maggiore facilità di analisi dal momento che l'acquisizione del GPS non era sincronizzata con l'acquisizione elettromiografica. Le velocità rilevate sono state correlate con la media delle attivazioni dei muscoli del collo (tabella 5.3).

Tabella 5.3 – Attività muscolare in funzione della velocità di marcia nelle curve a destra e a sinistra per il volontario ID C.

Velocità (km/h)	TRAP sx	TRAP dx	SCM sx	SCM dx	SPL sx	SPL dx	Media
38,9	1,5	10,1	3,0	2,2	2,6	1,3	3,5
36,0	2,4	5,4	5,3	2,2	2,7	1,4	3,2
33,8	2,6	12,0	3,5	3,2	3,4	1,7	4,4
33,8	2,8	11,7	8,3	4,3	3,6	1,5	5,4
33,1	1,7	5,5	3,8	4,8	7,3	1,5	4,1
30,2	3,8	14,3	10,6	5,3	5,2	2,2	6,9
29,2	2,5	11,2	6,0	8,4	3,8	1,7	5,6



Velocità (km/h)	TRAP sx	TRAP dx	SCM sx	SCM dx	SPL sx	SPL dx	Media
28,1	2,5	5,5	7,3	4,5	3,9	1,7	4,3
26,6	2,3	8,2	3,7	3,1	4,4	1,5	3,9
22,3	2,7	9,5	7,2	6,4	6,7	1,4	5,6
21,6	3,4	16,1	8,2	7,4	7,1	2,0	7,4
18,0	2,1	8,4	5,2	5,9	14,8	1,5	6,3
18,0	2,9	19,5	5,6	4,2	9,8	1,7	7,3
13,0	4,8	17,0	17,5	7,8	3,5	2,3	8,8
11,5	1,5	1,7	2,5	1,9	2,1	1,4	1,9
7,6	4,7	17,5	15,7	23,0	4,8	2,4	11,3

Dal grafico corrispondente (figura 5.26) si nota una lieve diminuzione dell'attivazione muscolare all'aumentare della velocità di guida, seppure con un basso coefficiente di relazione  $R^2$  (regressione lineare).

Questo vale sia per il soggetto preso in esame in figura 5.26 che altri partecipanti (Appendice C). Ricordiamo che il range di velocità è piuttosto basso per tutti i soggetti. Nel caso in esame, come si può vedere dalla tabella sopra riportata, si passa da circa 8 km/h a 39 km/h.

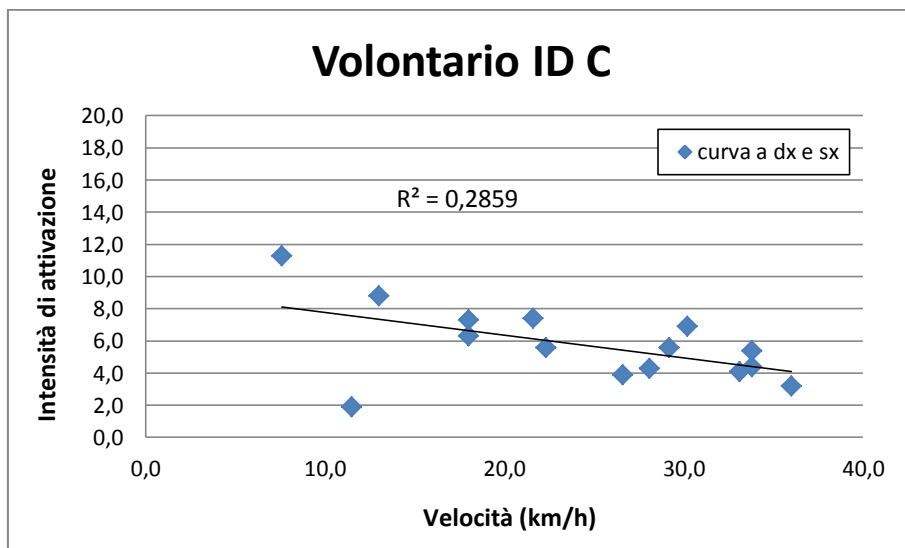


Figura 5.26 – Intensità di attivazione muscolare in funzione della velocità di marcia per il volontario ID C nelle curve a destra e sinistra.

La diminuzione di attivazione muscolare all'aumentare della velocità si può spiegare considerando che lo sterzo diventa più leggero all'aumentare della velocità stessa, richiedendo quindi uno sforzo muscolare minore. Le basse velocità prese in esame non lasciano notare altri effetti, come ad esempio quello della forza centrifuga, che probabilmente si registrerebbe a velocità più sostenute.

### 5.4.3 Confronto tra l'utilizzo dell'auto propria e quella del test

Per i soggetti che hanno eseguito la doppia prova, sia con la macchina utilizzata da tutti i partecipanti (Renault Clio), che con la propria, è stata valutata la differenza nell'attivazione muscolare durante la guida. I soggetti sono stati strumentati ed equipaggiati come descritto in precedenza ed è stata valutata l'attivazione muscolare nelle diverse fasi di guida, sia con la propria macchina che con quella comune agli altri volontari, mediante elettromiografia di superficie. In tabella 5.4 e 5.5 si riporta l'attivazione muscolare dei muscoli del collo e la media per ciascuna fase di guida monitorata per il volontario ID G<sup>1</sup> (analoghe tabelle sono state ottenute per il volontario ID H).

Tabella 5.4 – Attivazione muscolare dei muscoli del collo nelle varie fasi di guida per il volontario ID G alla guida della Citroen C5.

	<b>TRAP sx</b>	<b>TRAP dx</b>	<b>SCM sx</b>	<b>SCM dx</b>	<b>SPL sx</b>	<b>SPL dx</b>	<b>Media</b>
Curva sx	1,73	8,20	1,48	5,40	6,82	1,63	4,21
Curva dx	1,58	10,39	1,41	5,41	7,44	1,52	4,63
Frenata	0,93	2,13	0,78	2,08	2,49	0,92	1,56
Semaforo	1,00	1,71	0,66	1,41	1,71	0,94	1,24
V>70 km/h							
Guida normale	1,06	3,99	0,87	2,29	3,55	1,05	2,14
Frenata decisa							

<sup>1</sup> I valori del soggetto ID G. negli stati di guida a velocità superiore a 70 km/h e frenata decisa, con macchina propria (Citroen C5) non sono stati acquisiti.

Tabella 5.5 - Attivazione muscolare dei muscoli del collo nelle varie fasi di guida per il volontario ID G alla guida della Renault Modus.

	<b>TRAP sx</b>	<b>TRAP dx</b>	<b>SCM sx</b>	<b>SCM dx</b>	<b>SPL sx</b>	<b>SPL dx</b>	<b>Media</b>
Curva sx	2,45	5,31	2,49	6,05	8,61	2,13	4,51
Curva dx	2,13	6,31	1,72	5,46	7,48	2,19	4,22
Frenata	1,57	3,96	1,27	2,35	4,42	1,64	2,54
Semaforo	1,35	1,62	0,95	1,48	3,13	1,77	1,72
V>70 km/h	1,74	3,46	1,1	1,95	4,97	1,59	2,48
Guida normale	1,65	6,13	1,37	3,53	6,50	1,71	3,48
Frenata decisa	1,97	6,53	1,30	6,73	4,67	2,49	3,95

Dal confronto tra medie mediante il test t di Student si ottiene per il soggetto ID G la tabella 5.6 e per il soggetto ID H la tabella 5.7.

Tabella 5.6 – Confronto per il soggetto ID G.

<b>Renault Clio</b>		<b>Citroen C5</b>	
Media	3,27	Media	2,75
D.S.	1,04	D.S.	1,56
Varianza	1,09	Varianza	2,43
GDL		10	
t		0,73	

Tabella 5.7 - Confronto per il soggetto ID H.

<b>Renault Clio</b>		<b>Renault Modus</b>	
Media	2,35	Media	1,67
D.S.	1,10	D.S.	0,52
Varianza	1,21	Varianza	0,27
GDL		8	
t		1,48	

Il p-value risulta compreso tra 0,25 e 0,20 per il soggetto ID G, e tra 0,10 e 0,075 per il soggetto ID H. In entrambi i casi, considerando sempre un livello di significatività del 5%, viene accettata l'ipotesi nulla H0. È possibile affermare che non vi è differenza statisticamente significativa tra l'attivazione muscolare durante la guida della propria auto e quella durante la guida di una diversa vettura.

## 5.5 Discussione delle prove di tamponamento

### 5.5.1 Confronto tra soggetto consapevole e inconsapevole

L'analisi delle prove di tamponamento è stata avviata valutando l'eventuale corrispondenza tra le due tipologie di prove condotte per ciascun soggetto, ovvero verificando se tra la condizione teso mani sul volante (TMSV) e rilassato mani sul volante (RMSV) vi siano o meno differenze dello stato di attivazione muscolare.

È bene ricordare che in queste prove è stato preso in esame il segnale elettromiografico di ciascun soggetto un istante prima del tamponamento e confrontato, come nelle prove di guida, con l'attivazione muscolare che il volontario possiede in uno stato di rilassatezza muscolare.

Per ciascun soggetto è stato dunque identificato, in ciascuna prova, il tempo  $t_0$  in cui possedeva uno stato muscolare rilassato e un tempo  $t_1$  immediatamente prima dell'impatto. Così facendo è stato possibile, per le 4 prove che vedevano coinvolti i volontari nei test di tamponamento, estrarre lo stato di attivazione muscolare dei muscoli monitorati. Nella tabella sottostante si riporta a titolo di esempio lo stato di attivazione muscolare del soggetto ID E prima del tamponamento, nelle quattro prove svolte.

Tabella 5.8 – Stato di attivazione muscolare normalizzato per il volontario ID E nelle 4 prove di tamponamento.

Soggetto ID E												
	t0 (s)	t1 (s)	DEL sx	DEL dx	TRAP sx	TRAP dx	SCM sx	SCM dx	SPL sx	SPL dx	FLE sx	FLE dx
tmsv 6	86	119	0,96	1,29	1,04	1,23	1,14	0,96	1,01	1,02	2,45	1,26
tmsv 8	10	70	0,95	1,49	1,08	5,49	1,45	1,09	1,53	0,89	11,94	9,49
rmsv 6	9	55	1,13	1,18	1,25	0,90	1,38	1,54	1,53	1,18	0,34	3,73
rmsv 8	13	66	1,06	1,11	1,10	1,17	1,26	1,28	1,26	1,03	0,73	1,22

Nel grafico di figura 5.27 vengono riportati per il soggetto ID A le attivazioni muscolari per le 4 prove di tamponamento a cui è stato sottoposto. Notiamo che i valori delle attivazioni muscolari nel caso TMSV sono tendenzialmente più alti rispetto al caso RMSV.

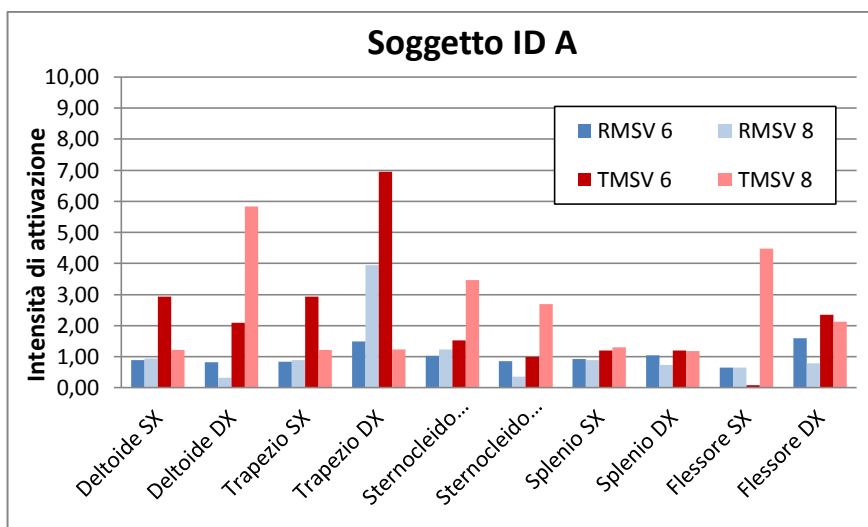


Figura 5.27 – Attivazione muscolare nelle prove di tamponamento per il volontario ID A.

Raggruppando le prove TMSV e RMSV e facendo per ogni soggetto la media dei soli muscoli del collo si nota ugualmente (figura 5.28) la stessa differenza riscontrata in precedenza: le attivazioni nelle prove TMSV sono leggermente superiori rispetto a quello nelle prove RMSV.

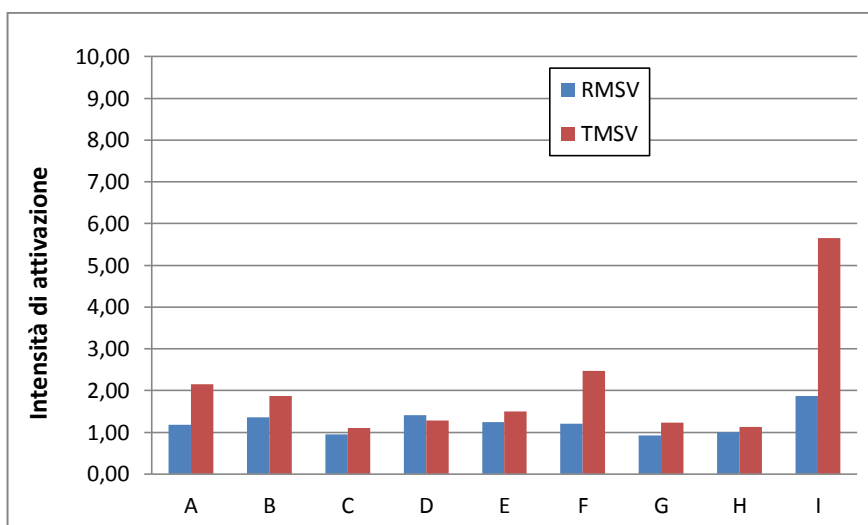


Figura 5.28 – Attivazione muscolare media dei muscoli del collo per ciascun volontario nelle prove TMSV e RMSV.

Solo per il volontario ID I si riscontra una netta differenza tra i due stati.

Come verifica è stato utilizzato il test t (t di Student) ad una coda per il confronto tra medie; questo test si usa quando la numerosità dei campioni è piccola, come nel caso in oggetto. Quando si effettua un test di significatività statistica, inizialmente si assume la cosiddetta «ipotesi zero» ( $H_0$ ) (o «ipotesi nulla»), secondo la quale non esiste una differenza statisticamente significativa tra i gruppi, riguardo al parametro considerato. Secondo l'ipotesi zero, i gruppi sono fra loro uguali e la differenza osservata va attribuita al caso. Il livello di significatività di una prova può essere scelto a piacere dallo sperimentatore, in generale viene scelto un livello di probabilità di 0,05 o di 0,01. In questo caso è stato scelto un livello di significatività di 0,05 (5%). Questa probabilità (detta valore P) rappresenta una stima quantitativa della probabilità che le differenze osservate siano dovute al caso. Più precisamente, il valore P è "la probabilità di ottenere un risultato altrettanto estremo o più estremo di quello osservato, se la diversità è interamente dovuta alla sola variabilità campionaria, assumendo quindi che l'ipotesi iniziale nulla sia vera". Eseguendo i calcoli sui campioni (TMSV e RMSV), si ottengono i valori riportati in tabella 5.9.

Tabella 5.9 – Analisi con la t di Student per le prove TMSV e RMSV.

TMSV – RMSV	
GDL	8
t	1,67

Possiamo notare che la distribuzione sotto l'ipotesi nulla è una t di Student con 8 gradi di libertà (GDL). Il valore osservato dalla statistica test è 1,67. Consultando la tavola di t con 8 gradi di libertà, troviamo che il valore che stabilisce un'area nella coda destra del 7,5% è 1,592 ed il valore che stabilisce un'area nella coda destra del 5% è 1,859. Il P-value è compreso, quindi, tra 0,075 e 0,05 (figura 5.29).

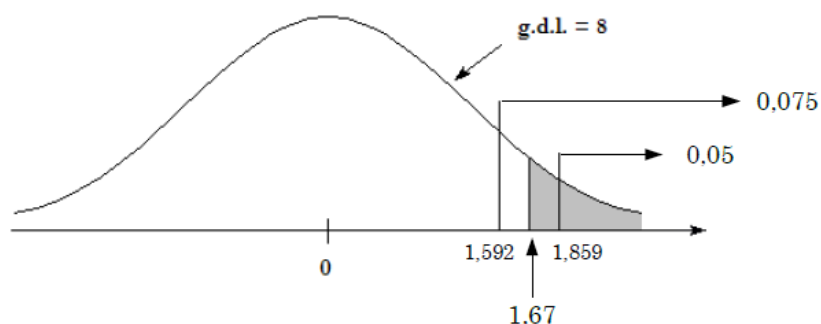


Figura 5.29 - Area della coda destra compresa tra 0,075 e 0,05.

Il valore  $t_{(8)} = 1,67$  è inferiore al livello di probabilità del 5%. Ciò significa che prefissando un errore del 5%, ossia un'affidabilità dei dati del 95%, il valore ottenuto è inferiore al valore critico, ciò implica l'accettazione dell'ipotesi nulla  $H_0$ , secondo la quale la differenza tra medie non è statisticamente significativa. Secondo l'ipotesi nulla, i gruppi sono tra loro uguali, e la differenza osservata va attribuita al caso. Per cui la differenza tra l'attivazione muscolare nel tamponamento TMSV e l'attivazione muscolare nel tamponamento RMSV non è significativa.

Solo nel soggetto ID I, al quale è stato chiesto di mantenere volontariamente una postura tesa (cioè irrigidita), sono state riscontrate differenze significative tra lo stato di attivazione muscolare delle prove TMSV e RMSV. L'attesa dell'urto irrigidendo braccia e gambe, e afferrando il volante (figura 5.30) ha provocato una rilevante differenza fra la condizione consapevole ed inconsapevole.



Figura 5.30 – Posizione pre-urto del volontario ID I al quale era stato chiesto di assumere una postura irrigidita.

Sono stati inoltre messi a confronto i livelli di attivazione muscolare nelle fasi di guida analizzate (attesa al semaforo, guida normale e frenata decisa), con i livelli di attivazione muscolare nei casi di tamponamento TMSV e RMSV. Lo scopo era quello di verificare un'eventuale corrispondenza tra i livelli di attivazione muscolare durante i tamponamenti, ed uno degli stati di guida presi in esame. In figura sottostante si riporta per ciascun soggetto lo stato di attivazione medio dei muscoli del collo raggiunto nelle prove di tamponamento e nelle prove di guida analizzate.

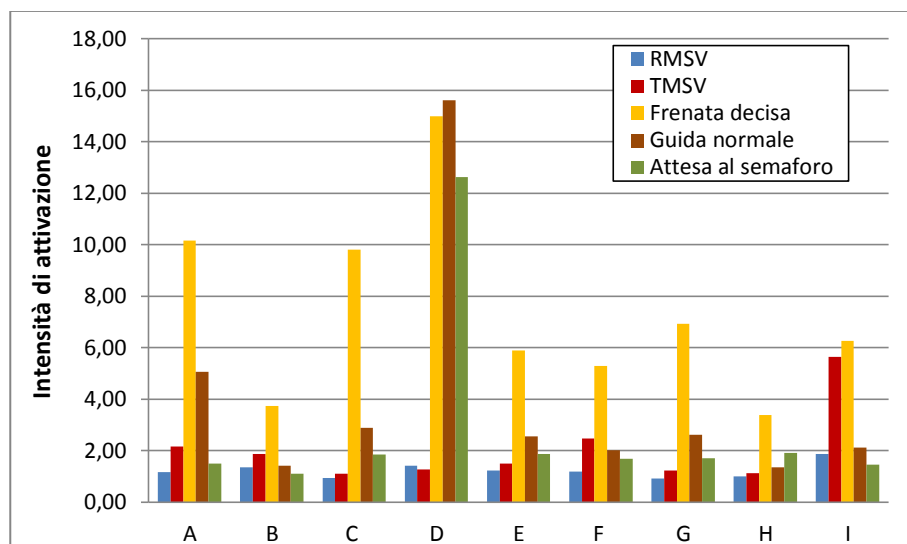


Figura 5.31 - Confronto tra i livelli di attivazione muscolare nelle fasi di guida analizzate e i livelli di attivazione muscolare nei casi di tamponamento TMSV e RMSV.

Seppur possibile rilevare che solitamente l'attivazione muscolare è più alta durante la guida, dai confronti non è emersa una correlazione precisa tra il livello di attivazione muscolare durante i tamponamenti e gli eventi di guida considerati, per nessun soggetto analizzato. Questo risultato si evidenzia con il test t Student mediante il quale sono stati effettuati i confronti tra medie (tabella 5.10).



Tabella 5.10 – Confronto tra le medie con t di Student.

TMSV – Guida normale		
GDL	9	15%<P<10%
t	1,32	
TMSV – Frenata decisa		
GDL	9	0,5%<P<0,25%
t	3,33	
RMSV – Guida normale		
GDL	8	5% < P < 2,5%
t	1,94	
RMSV – Attesa al semaforo		
GDL	8	10%<P<15%
t	1,21	

Imponendo un livello di significatività del 5% per tutti i casi, è possibile affermare che nel confronto tra il livello di attivazione muscolare durante il tamponamento TMSV ed il livello di attivazione muscolare durante lo stato di guida normale, il valore  $t_{(9)} = 1,32$  è inferiore al valore critico ( $p_5 = 1,83$ ), per cui si accetta l'ipotesi nulla  $H_0$ , secondo la quale la differenza tra i due gruppi è dovuta al caso.

L'ipotesi nulla  $H_0$  si accetta anche nel confronto tra il livello di attivazione muscolare nel tamponamento RMSV ed il livello di attivazione muscolare durante la guida normale, e nel confronto tra il livello di attivazione muscolare nel tamponamento RMSV ed il livello di attivazione muscolare durante l'attesa al semaforo. I valori sono rispettivamente  $t_{(8)} = 1,94 < p_5 = 1,85$  e  $t_{(8)} = 1,21 < p_5 = 1,85$ . In entrambi i casi non esiste differenza tra i gruppi. L'attivazione muscolare nel caso di tamponamento TMSV è uguale a quella che si registra nel caso di guida normale e che l'attivazione muscolare nel caso di tamponamento RMSV è uguale a quella che si manifesta nei casi di guida normale ed attesa al semaforo. Il fatto che l'attivazione muscolare nel caso di tamponamento TMSV e l'attivazione muscolare nel caso RMSV siano uguali all'attivazione muscolare durante la guida normale, non deve stupire, dal momento che non è stata riscontrata una differenza statisticamente significativa tra l'attivazione muscolare nel caso di tamponamento TMSV e l'attivazione muscolare nel caso RMSV. L'errore è da ricondursi, con buona probabilità, alla modalità di esecuzione dei test, in particolare nel caso di tamponamento TMSV. Infatti, l'attivazione muscolare nel caso di tamponamento TMSV risulta, dall'analisi statistica, uguale al livello di attivazione muscolare nel caso di guida normale, durante la quale si suppone, invece, che il soggetto sia rilassato.

Nel confronto tra l'attivazione muscolare nel caso TMSV e l'attivazione muscolare durante la frenata decisa, invece, il valore  $t_{(9)} = 3,33$  è maggiore del valore critico legato alla probabilità del 5%  $p_5 = 1,83$ . In questo caso l'ipotesi nulla  $H_0$  viene rifiutata, mentre si accetta l'ipotesi alternativa  $H_1$ . La differenza tra medie è statisticamente significativa. In questo caso il p-value è compreso tra 0,005 e 0,0025: la differenza è significativa per  $p < 0,005$  (ma non per  $p < 0,0025$ ). Ciò significa che c'è una probabilità dello 0,5% (ma non dello 0,25%) che la differenza di attivazione muscolare tra il caso di tamponamento TMSV e lo stato di frenata decisa sia dovuta al caso. L'attivazione muscolare durante il tamponamento TMSV è diversa dall'attivazione muscolare durante la frenata decisa e tale differenza non è casuale.

Si precisa che i risultati di un test statistico non hanno un valore di assoluta e matematica certezza, ma soltanto di probabilità. Se l'ipotesi zero viene respinta al livello di significatività 5%, allora abbiamo il 5% di probabilità di respingere un'ipotesi zero che, in effetti, era vera.

### 5.5.2 Crash test ripetuti

Come precedentemente detto, tutti i volontari sono stati sottoposti a test di tamponamento consecutivi. Solitamente ciascun soggetto ha subito 4 tamponamenti a bassa velocità, 2 consapevoli e 2 inconsapevoli. Separando i due tipi di test per evitare l'effetto di influenza, il campione del primo test è stato confrontato con quello del secondo test: in nessun caso una differenza statisticamente significativa nei segnali EMG è stata rilevata, né per i soggetti consapevoli, né per quelli inconsapevoli.

Infatti per il tipo consapevole (TMSV) è stato ottenuto un P-value minimo di 0,21, mentre per la media di tutti i muscoli è stato pari a 0,88; per il tipo inconsapevole (RMSV), il P-value minimo è stato 0,11, e 0,43 per la media di tutti i muscoli. Ciò suggerisce che il primo test non ha influenzato il successivo.

### 5.5.3 Severità di impatto

Per valutare la severità dell'impatto in termini di accelerazione della testa dell'occupante è stato definito il coefficiente adimensionale  $k$ . Tale coefficiente è calcolato come rapporto tra l'accelerazione massima subita dalla testa e l'accelerazione massima subita dalla macchina:

$$k = \frac{a_{MAX\_testa}}{a_{MAX\_macchina}} \quad (6.1)$$

Il parametro  $k$  permette di confrontare crash a diversa velocità. Il valore  $k$  può essere visto come fattore di amplificazione degli effetti sulla testa dell'accelerazione subita dal veicolo (Figura 5.32). In appendice D vengono riportati i valori di  $k$  per ciascun soggetto.

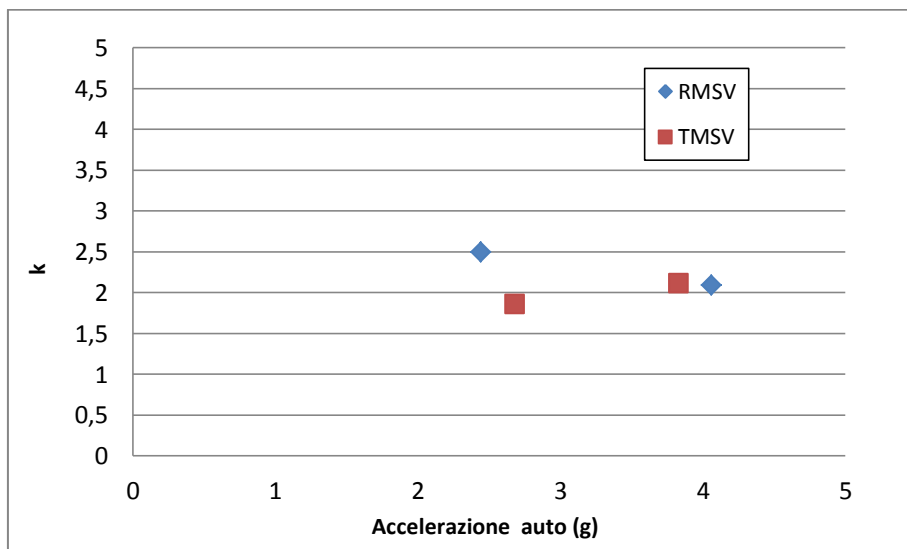


Figura 5.32 – Valore di  $k$  in funzione dell'accelerazione dell'auto per il volontario ID G.

Nell'analisi effettuata si nota che il valore di  $k$  non subisce grosse variazioni nei due casi: TMSV e RMSV (figura 5.32). Questo risultato è in accordo con quanto riscontrato dall'analisi del segnale elettromiografico che si ricorda non aveva evidenziato particolari differenze di comportamento tra il livello di attivazione muscolare nei casi TMSV e RMSV per nessuno dei soggetti. Il coefficiente  $k$  ha mostrato di essere statisticamente lo stesso per soggetti consapevoli ed inconsapevoli (i valori medi sono 1.85 e 1.90, rispettivamente, con un P-value pari a 0.4).

Esaminando i filmati ad alta velocità, si evidenzia una notevole differenza di comportamento del soggetto IDI nel caso TMSV, rispetto a tutti gli altri soggetti nella stessa configurazione, al quale era stato chiesto di adottare una postura deliberatamente tesa. Il comportamento dello stesso soggetto nella configurazione RMSV risulta, invece, comparabile con quello degli altri soggetti, che non mostrano particolari differenze nelle due configurazioni. Questo tipo di postura, in cui il soggetto irrigidisce notevolmente muscoli di collo, braccia e gambe, influenza anche il valore di  $k$ : in questo caso l'accelerazione massima della testa è maggiore rispetto al caso teso mani sul volante (vedi tabella 5.11).

Tabella 5.11 – Accelerazioni massime testa e auto per il volontario ID I.

	$a_{MAX\_testa}$	$a_{MAX\_macchina}$	$k$
TMSV 6	2,63	2,75	0,96
TMSV 8	5,1	4,55	1,12
RMSV 8	7,85	3,37	2,33
RMSV 6	12,21	5,87	2,08

Come mostrato in figura 5.33, in condizione TMSV è stata raggiunta circa la stessa accelerazione longitudinale di picco per la testa ed il veicolo ( $k$  vicino ad 1), mentre nella condizione normale di soggetto inconsapevole (figura 5.34), la testa ha subito una accelerazione massima circa doppia del veicolo ( $k$  maggiore di 2). Ne consegue che non è sufficiente essere consapevoli dell'impatto imminente per minimizzare il rischio di lesione da colpo di frusta, se non è mantenuta una postura particolarmente protettiva.

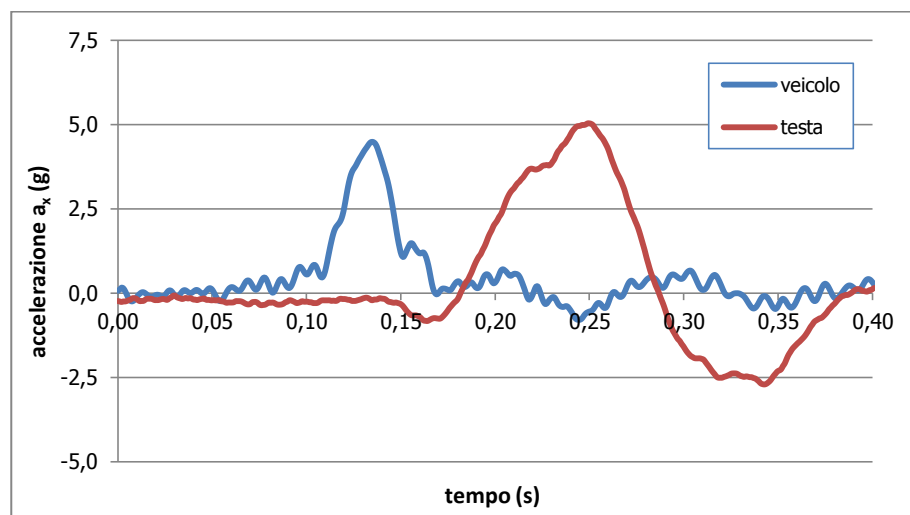


Figura 5.33 - Accelerazione longitudinale della testa e del veicolo del soggetto ID I consapevole e deliberatamente teso.

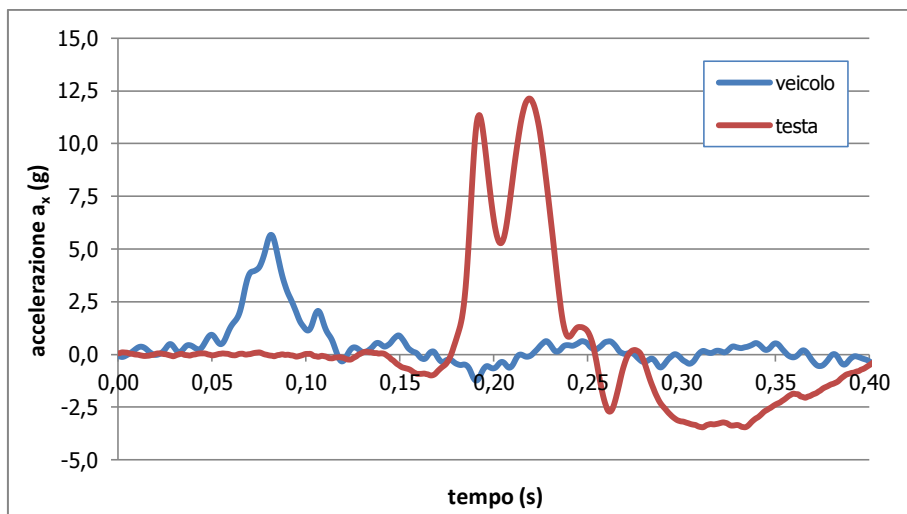


Figura 5.34 - Accelerazione longitudinale della testa e del veicolo del soggetto ID I inconsapevole.

#### 5.5.4 Analisi degli spostamenti

Ultimo risultato delle prove di tamponamento deriva dall'analisi effettuata con i video registrati dalla telecamera ad alta velocità. L'applicazione di marker sul veicolo e sulla testa del volontario hanno permesso di effettuare un esame degli spostamenti della testa del soggetto tamponato.

Per ciascun soggetto, successivamente alla calibrazione del video ad alta velocità mediante il software MotionScope, è stato monitorato lo spostamento della testa con campionamento ogni 0,02s. Il movimento della testa è stato registrato dall'istante in cui l'auto veniva tamponata per 0,32s.

Per tutti i volontari non sono state riscontrate differenze rilevanti tra gli andamenti degli spostamenti della testa nelle prove RMSV e TMSV. Come possibile osservare in figura sottostante, nella quale è riportato lo spostamento relativo ( $\Delta s$ ) tra auto e testa in funzione del tempo, le curve per le due prove sono sostanzialmente sovrapposte.

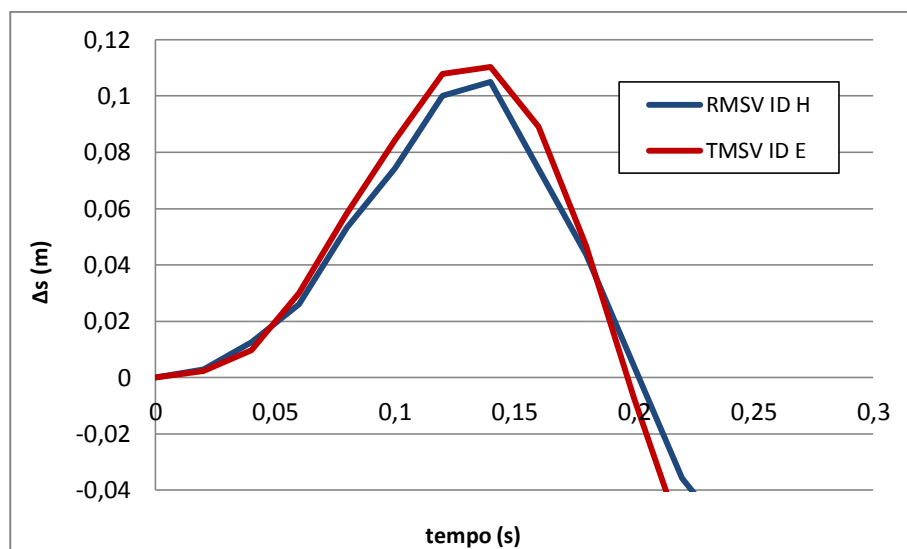


Figura 5.35 - spostamento relativo ( $\Delta s$ ) tra auto e testa in funzione del tempo.

Questo risultato risulta in pieno accordo con quello ottenuto dall'analisi del segnale elettromiografico che non avevo anch'esso evidenziato particolari differenze di attivazione muscolare tra le due prove di tamponamento condotte: TMSV e RMSV.

Per il soggetto volontario ID I, al quale era stato chiesto di assumere una posizione particolarmente protettiva durante le prove TMSV, si riscontrano particolari differenze anche nell'analisi degli spostamenti. Mentre nelle prove in cui il soggetto era inconsapevole i risultati ottenuti sono confrontabili a quelli degli altri volontari, nelle prove in cui il soggetto assumeva una postura deliberatamente tesa lo spostamento relativo tra auto e testa è minimo (figura 5.36).

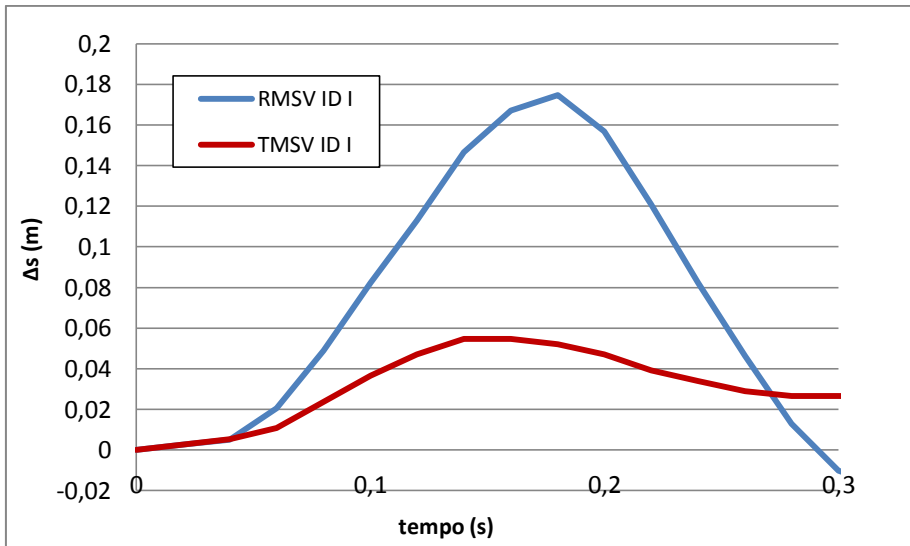


Figura 5.36 - spostamento relativo ( $\Delta s$ ) tra auto e testa in funzione del tempo per il volontario ID I.

Quest'ultima analisi Nell'articolo viene presentato un approccio semi-empirico per valutare l'energia cinetica dissipata negli urti tra auto e moto nel caso in cui la moto venga coinvolta nella parte frontale muscolare non risulta differente a meno che il soggetto non mantenga una postura particolarmente protettiva.





## 6 Conclusioni

L'attività di ricerca condotta è stata focalizzata sullo studio di alcune classi particolari di urto con l'obiettivo di contribuire a colmare il relativo avanzamento scientifico e favorire di conseguenza la ricostruzione della dinamica degli incidenti stradali. Le due categorie particolari di urti analizzate sono gli urti tra autoveicoli e motoveicoli e ad i tamponamenti a bassa velocità. La diversità tra le due categorie ha suggerito di suddividere il lavoro in due parti, analizzando separatamente dinamiche e problematiche caratteristiche di ciascuna.

Per quanto concerne lo studio degli urti tra motoveicoli ed autoveicoli l'obiettivo è stato duplice: da un lato sviluppare un metodo semi-empirico per valutare l'energia cinetica dissipata negli urti tra auto e moto nel caso in cui la moto venga coinvolta nella parte frontale, dall'altro ricercare un'equazione semplificata che permetta di stimare la velocità relativa del motoveicolo, tramite la stima dell'energia di deformazione, tenendo in considerazione la massa del conducente del motoveicolo al momento dell'impatto.

Per quanto riguarda l'energia dissipata nelle deformazioni del mezzo a due ruote, è stata inizialmente condotta l'analisi dei crash test tra motoveicoli e barriera rigida disponibili in letteratura ridefinendo, dopo un'opportuna analisi e scrematura dei dati, la relazione sperimentale tra accorciamento del passo ed Energy Equivalent Speed (EES).

Successivamente è stata condotta una campagna di prove sperimentali con l'obiettivo di valutare l'eventuale influenza durante l'impatto dell'estensione delle forcelle anteriori sull'accorciamento della moto e per analizzare i punti di contatto e il relativo scambio di forze tra moto e barriera rigida.

I risultati sperimentali delle prove contro barriera rigida hanno messo in luce differenze trascurabili rispetto ai risultati di letteratura, in termini di relazione tra EES e  $\Delta p$ . Tali prove hanno permesso di escludere l'escursione delle forche anteriori, tipica nella frenata di emergenza del motociclo prima dell'impatto, come variabile che influenza la relazione tra accorciamento del passo ed EES.

Come osservato dai crash test, nella quasi totalità dei casi, ancor prima che la forza anteriore inizi a deformarsi essa è compressa al massimo, per cui sia che la moto fosse già in frenata o no, in tutti i casi la deformazione delle forche inizia quando le sospensioni sono già compresse.

La linearità riscontrata anche in letteratura tra EES e accorciamento del passo viene confermata per  $\Delta p$  inferiori ai 40 cm e per deformazioni che interessano la parte frontale del mezzo senza che si verifichino rotture di componenti strutturali. Per accorciamenti del passo maggiori di 40 cm, non si ha più linearità con l'EES ed il modello proposto non può essere applicato. Negli urti a velocità elevata si verifica una rotazione del mezzo sul piano verticale e una distribuzione di forze non trascurabile tra barriera e parte alta della zona frontale del motociclo, ad alta velocità.

Per quanto riguarda l'energia dissipata nell'urto dall'autoveicolo, è stato applicato il metodo del Triangolo, che consente di valutare l'energia dissipata a partire dalla forza scambiata con la moto e dalla entità della deformazione sull'auto, indipendentemente dalla zona dell'auto interessata dall'urto e dalla relativa rigidità strutturale.

A verifica del metodo complessivo per la valutazione dell'energia dissipata da entrambi i veicoli, è stata svolta una campagna di prove sperimentali che simulano lo scontro tra motociclo, senza conducente, e autoveicoli cui risultati, seppure basati su una numerosità delle prove limitata, consentono di validare il metodo proposto.

Al fine di raggiungere il secondo obiettivo per questa classe di urti, è stato successivamente condotto uno studio sul moto del mezzo a due ruote e del suo pilota durante un urto mediante l'analisi di alcuni crash test presenti in letteratura e altri condotti dagli stessi autori sia contro barriera rigida che tra moto e auto. Non essendo rigidamente vincolato al suo mezzo, il motociclista scivola sulla sella ma la sua massa in parte contribuisce alla deformazione plastica dei veicoli durante la fase di compressione. A seguito di ciò è stata individuata una equazione approssimata di bilancio energetico per il calcolo della velocità relativa tra moto ed auto al momento dell'urto, applicabile nei casi in cui al momento dell'impatto il conducente del motoveicolo sia ancora in sella. L'equazione trovata per il calcolo della velocità relativa tra auto e moto, del tutto analoga come forma a quella impiegata per urti tra due soli corpi, è funzione dell'energia cinetica dissipata globalmente nell'urto, delle masse dei tre corpi e del coefficiente di restituzione.

La validazione dell'equazione, effettuata attraverso il confronto con i risultati di una campagna di crash test tra auto e moto con manichino nel range di velocità tra 30 e 50 km/h, ha fornito un errore massimo sul calcolo della velocità relativa che non supera i 2,5 km/h.

L'equazione approssimata determinata consente di potere analizzare gli urti tra mezzi a due ruote e autoveicoli a partire dalla stima della energia di

deformazione dei veicoli, senza necessità di utilizzare la conservazione della quantità di moto. Questa ultima, infatti, difficilmente può essere applicata in modo rigoroso nell'analisi degli incidenti reali, a causa della mancanza di dati sulle traiettorie e moti post urto dei tre corpi coinvolti: auto, moto e suo conducente. L'equazione ricavata, quindi, costituisce uno strumento di pratico utilizzo per lo studio delle cause degli incidenti stradali e permette di determinare la velocità relativa di impatto con una migliore approssimazione rispetto a quanto ottenibile trascurando la massa del conducente.

Per quanto concerne l'attività condotta sui tamponamenti a bassa velocità, mentre è ben noto in letteratura l'influenza della attivazione muscolare nel ridurre effetti lesivi al rachide, l'obiettivo è stato quello di valutare le possibili correlazioni tra il livello di attivazione muscolare del collo durante la guida normale ed il livello di attivazione muscolare del collo durante i test di tamponamento a bassa velocità. Abitualmente impiegati per identificare le soglie di lesività degli occupanti in funzione della severità dell'urto, i test di tamponamento su volontari infatti sono spesso oggetto di critica in quanto ad essi non è mai stata affiancata una ricerca che consenta di verificare se l'attività muscolare in questi crash test possa essere paragonata a quella presente durante alcune fasi tipiche di guida nelle quali si concretizzano i tamponamenti reali. In base ai risultati ottenuti è stato possibile valutare la significatività delle numerose prove sperimentali su volontari che si trovano in letteratura, che spesso vengono contestate proprio in quanto eseguite su soggetti che sono consci dell'imminente urto.

Nove soggetti umani per studiare l'attività muscolare durante fasi di guida normale e prima di effettuare crash test di tamponamento a bassa velocità. È stata impiegata l'elettromiografia di superficie come tecnica di misura per valutare l'attivazione muscolare. Ai soggetti è stato richiesto di guidare su un percorso cittadino; in seguito sono stati sottoposti a crash test di tamponamento a bassa velocità, adottando due diverse velocità di impatto nominali (6 ed 8 km/h) e in due condizioni: consapevoli ed inconsapevoli dell'approssimarsi dell'impatto.

Il monitoraggio attraverso l'elettromiografia ha mostrato che è possibile registrare diversi livelli di attivazione muscolare in diverse fasi di guida, con la frenata decisa che produce valori più alti, mentre l'attesa al semaforo comporta i più bassi. Per quanto riguarda i momenti precedenti i crash test, la condizione di consapevolezza solitamente comporta livelli di attivazione più alti rispetto al caso di soggetto inconsapevole, ma limitatamente ad una piccola, non sempre statisticamente rilevante, differenza. Solo quando viene assunta una postura deliberatamente tesa è stata osservata una differenza significativa. Ciò è stato confermato anche dall'analisi del rapporto fra accelerazione della testa e del veicolo. Per quanto riguarda il confronto coi livelli di attivazione ottenuti durante la guida su strada, la ricerca ha evidenziato che solitamente durante i crash test

l'attività muscolare è inferiore; livelli di attivazione confrontabili con quelli tipici della frenata decisa vengono registrati solo nel caso che sia adottata una postura tesa con soggetto consapevole, mentre spesso con soggetto inconsapevole è stato ottenuto un basso livello di attivazione. Da questa attività si conclude che i test su volontari svolti per indagare sulle possibili soglie lesive delle accelerazioni subite dall'occupante durante il tamponamento risultano valide e correlabili direttamente alle normali condizioni di guida, mentre per avere indicazioni sulle possibili soglie lesive in caso di tamponamento in fase di frenata brusca o di emergenza, è necessario condurre prove con soggetti volontariamente testati, in una postura che attivi con decisione i muscoli del collo.

## 7 Indice delle figure

Figura 1.1 - Distanze percorse dal motoveicolo durante le fasi di pre-urto, urto e post-urto. ....	18
Figura 1.2 – Metodo di traino per motoveicolo per la sperimentazione di Medwell, McCarty e Shanahan. ....	21
Figura 1.3 - Tecnica utilizzata in [7] per il trascinamento e successivo lancio dei veicoli a due ruote. ....	23
Figura 1.4 – Range dell'angolo di decollo del pilota. ....	26
Figura 1.5 – Velocità di impatto in funzione della velocità di decollo. ....	26
Figura 2.1 - Schematizzazione ad un grado di libertà dell'urto tra due veicoli. ....	29
Figura 2.2 – Piano di impatto e di restituzione. ....	41
Figura 2.3 - Vettori delle velocità prima e dopo l'urto per un dato valore di $\epsilon$ . ....	42
Figura 2.4 – Piano di restituzione e scorrimento. ....	43
Figura 2.5 - Velocità prima e dopo l'urto in funzione dei valori dei coefficienti di restituzione e di scorrimento. ....	44
Figura 2.6 - Correlazione tra variazione di passo ed energia specifica. ....	46
Figura 2.7 - Correlazione tra deformazione auto ed energia assorbita. ....	47
Figura 2.8 - Correlazione tra il rapporto tra l'energia assorbita dall'autoveicolo e l'energia assorbita totale e la velocità relativa prima dell'urto. ....	48
Figura 2.9 - Fasi della “prova del pendolo”: a) aggancio; b) messa in sospensione; c) sgancio; d) impatto. ....	49
Figura 2.10 – Metodo di lancio utilizzato nelle prove contro barriera rigida in [21]. ....	50
Figura 2.11 - Correlazione sperimentale con dati di letteratura tra accorciamento del passo e EES ottenuto attraverso crash test contro barriera rigida. I simboli rossi sono riferiti a motociclette, quelli blu a scooter. ....	52
Figura 2.12 – Esempi di rottura del telaio e di arrivo all'urto in posizione non corretta. ....	53

Figura 2.13 - Danneggiamento del cerchio anteriore a seguito dell'urto.	54
Figura 2.14 – Rottura forche a seguito dell'urto.	55
Figura 2.15 – Rottura canotto di sterzo a seguito dell'urto.	55
Figura 2.16 - La ruota anteriore impatta contro il telaio del motoveicolo limitando l'accorciamento del passo.	56
Figura 2.17 - Dettaglio della forcella, in seguito all'urto.	56
Figura 2.18 - Vista post urto dello scooter.	57
Figura 2.19 - Vista post urto del motoveicolo.	58
Figura 2.20 - Vista post urto del motoveicolo.	59
Figura 2.21 - La forcella non subisce una deformazione consona, a causa della errata direzione di impatto del mezzo.	60
Figura 2.22 – Dettaglio del test condotto su Suzuki GSX 250 a 70km/h..	60
Figura 2.23 - Correlazione sperimentale con dati di letteratura tra accorciamento del passo e EES, a seguito di scrematura, ottenuto attraverso crash test contro barriera rigida.	61
Figura 2.24 - Panoramica della prova.	62
Figura 2.25 - Posizionamento della cella con relativa semisfera.	64
Figura 2.26 - Braccio di sostegno dotato di sistema di sgancio.	65
Figura 2.27 - Configurazione di lancio.	66
Figura 2.28 - Vista posteriore della barriera in cemento.	67
Figura 2.29 - Collegamento dell'elastico alla puleggia.	68
Figura 2.30 – Prova effettuata con precompressione forche anteriori.	68
Figura 2.31 - Cedimento del canotto di sterzo in seguito all'impatto e posizione dell'accelerometro.	70
Figura 2.32 - Dettaglio della forza relativo alla cella 1.	71
Figura 2.33 - Dettaglio della forza relativo alla cella 2.	71
Figura 2.34 - Dettaglio della forza relativo alla cella 3.	72
Figura 2.35 - Carico massimo ottenuto dalla somma dei valori relativi alle tre celle di carico.	72
Figura 2.36 - Andamento della forza in funzione del tempo rilevato dalle tre celle di carico poste sulla barriera strumentata. Le curve rossa e blu si riferiscono alle celle posizionate nella parte bassa della barriera, mentre la curva nera è il segnale derivante dalla cella in alto.	73
Figura 2.37 - Correlazione sperimentale tra accorciamento del passo e EES ottenuto attraverso crash test contro barriera rigida. In blu i dati di letteratura, in rosso e in giallo quelli delle prove condotte.	74
Figura 2.38 - Confronto tra l'EES reale e quello stimato con la (2.60) (punti rossi), e confronto tra l'EES reale e quello stimato con la procedura prevista da Wood [23] (punti blu).	76

Figura 2.39 - Danneggiamento di un'auto sulla portiera a seguito di un impatto a 90° con una moto. ....	77
Figura 2.40 - Danneggiamento di un'auto sulla parte posteriore della fiancata a seguito di un impatto a 90° con una moto. ....	78
Figura 2.41 - Schematizzazione del danno sull'auto derivante da una collisione con una moto. ....	78
Figura 2.42 - Schema semplificato del danno triangolare. ....	79
Figura 2.43 - Distribuzione dei carichi sul danno triangolare. ....	80
Figura 2.44 - Rappresentazione schematica dell'andamento della forza in funzione sia di $C$ che di $I$ . ....	82
Figura 2.45 – Metodo impiegato per lanciare il motoveicolo. ....	87
Figura 2.46 – Veicoli impiegati nella prova ID 1. ....	88
Figura 2.47 – Introflessione sull'autoveicolo nella prova ID 1. ....	89
Figura 2.48 – Motoveicolo della prova ID 1 dopo l'urto. ....	90
Figura 2.49 - Veicoli impiegati nella prova ID 2. ....	91
Figura 2.50 - Introflessione sull'autoveicolo nella prova ID 2. ....	91
Figura 2.51 - Motoveicolo della prova ID 2 dopo l'urto. ....	92
Figura 2.52 - Veicoli impiegati nella prova ID 3. ....	93
Figura 2.53 - Motoveicolo della prova ID 3 dopo l'urto. ....	93
Figura 2.54 - Veicoli impiegati nella prova ID 4. ....	94
Figura 2.55 - Introflessione sull'autoveicolo nella prova ID 4. ....	95
Figura 2.56 - Motoveicolo della prova ID 4 dopo l'urto. ....	95
Figura 2.57 - Veicoli impiegati nella prova ID 5. ....	96
Figura 2.58 - Veicoli impiegati nella prova ID 6. ....	97
Figura 2.59 – Veicoli della prova ID 6 dopo l'urto. ....	98
Figura 3.1 - Schema delle tipologie di incidenti che coinvolgono i mezzi a due ruote. ....	104
Figura 3.2 – Posizioni iniziali e finali dei 3 corpi. ....	107
Figura 3.3 - Tipologie di urti simulati. ....	111
Figura 3.4 – Applicativo programmato in LabView. ....	112
Figura 3.5 - Confronto tra la velocità relativa impostata nella simulazione e quella calcolata con la (3.15) per i 350 casi simulati. ....	114
Figura 3.6 - Confronto tra la velocità relativa impostata nella simulazione e quella calcolata con la (3.17) per i 350 casi simulati. ....	116
Figura 3.7 - Prove di crash test tra auto e moto con conducente svolte presso l'Università degli Studi di Firenze. ....	117
Figura 3.8 - Veicoli del test ID 1. ....	119
Figura 3.9 - Veicoli dopo l'impatto del test ID 1. ....	119
Figura 3.10 - Veicoli del test ID 2. ....	120
Figura 3.11 - Veicoli dopo l'impatto del test ID 2. ....	121
Figura 3.12 - Veicoli del test ID 3. ....	122

Figura 3.13 - Veicoli dopo l'impatto del test ID 3. ....	122
Figura 3.14 - Veicoli del test ID 4. ....	123
Figura 3.15 - Veicoli dopo l'impatto del test ID 4. ....	123
Figura 3.16 - Veicoli del test ID 5. ....	124
Figura 3.17 - Veicoli dopo l'impatto del test ID 5. ....	125
Figura 3.18 - Veicoli del test ID 6. ....	126
Figura 3.19 - Veicoli dopo l'impatto del test ID 6. ....	126
Figura 3.20 - $V_R$ stimata con la (3.17) in funzione della $V_R$ reale. ....	128
Figura 3.21 - $V_R$ stimata con la (3.15) e la (3.17) in funzione della $V_R$ reale, calcolando l'energia dissipata con il modello semi-empirico sviluppato. ....	129
Figura 3.22 - Metodo di traino adottato da Priester nei suoi crash test tra auto e moto. ....	130
Figura 4.1 - Dinamica del colpo di frusta. ....	136
Figura 4.2 - Esempio di accelerazioni auto, spalle e testa. ....	137
Figura 4.3 - Risposta cinematica degli occupanti nei tamponamenti a bassa velocità. ....	138
Figura 4.4 - Esempio della relazione tra NIC e accelerazioni della testa e della T1. ....	142
Figura 4.5 - Schematizzazione del tamponamento. ....	144
Figura 4.6 - Rotazioni massime della testa in funzione della rigidezza [37]. ....	146
Figura 4.7 - Classificazione della sicurezza offerta dal poggiatesta. ....	147
Figura 4.8 - Configurazioni di tamponamento effettuate nelle prove descritte in [41] e [42]. ....	149
Figura 4.9 - In alto tamponamento con underride, in basso tamponamento senza underride. $\Delta V=12\text{km/h}$ . ....	149
Figura 4.10 - andamento del NIC in funzione della configurazione di tamponamento underride o engagement. ....	150
Figura 4.11 - Correlazioni tra le deformazioni presenti sul veicolo e la durata dell'impatto (fonte AZT). ....	153
Figura 4.12 - Correlazioni tra il coefficiente di restituzione e la durata dell'impatto. ....	154
Figura 4.13 - Orientamento dell'accelerometro lungo i tre assi. ....	155
Figura 4.14 - Posizione degli accelerometri di confronto. ....	158
Figura 4.15 - Accelerometri A e B (a) montati sul tunnel posteriore e accelerometro D (b) montato sul tunnel anteriore (Renault Clio II). ....	158
Figura 4.16 - Uno degli accelerometri Clearbox montato sulla Renault Clio II. ....	159
Figura 4.17 - Direzioni positive per le accelerazioni longitudinali e trasversali. ....	159



Figura 4.18 - Prova 3, accelerometro UNIFI01, direzione longitudinale (Fiat Punto I).....	163
Figura 4.19 - Prova 3, accelerometro UNIFI01, direzione trasversale (Fiat Punto I).....	163
Figura 4.20 - Prova 3, accelerometro UNIFI02, direzione longitudinale (Fiat Punto I).....	164
Figura 4.21 - Prova 3, accelerometro UNIFI02, direzione trasversale (Fiat Punto I).....	164
Figura 4.22 - Prova 3, accelerometro UNIFI03, direzione longitudinale (Fiat Punto I).....	165
Figura 4.23 - Prova 3, accelerometro UNIFI03, direzione trasversale (Fiat Punto I).....	165
Figura 4.24 - Prova 3, accelerometro di riferimento A, direzione longitudinale (Fiat Punto I). ....	166
Figura 4.25 - Prova 3, accelerometro di riferimento D, direzione longitudinale (Fiat Punto I). ....	166
Figura 4.26 - Prova 3, accelerometro di riferimento D, direzione trasversale (Fiat Punto I).....	167
Figura 4.27 - Prova 3, confronto fra accelerometri Clearbox e gli accelerometri di riferimento, direzione longitudinale (Fiat Punto I). ....	167
Figura 4.28 - Valori di picco rilevati dagli accelerometri Clearbox in funzione del valore medio delle rilevazioni degli accelerometri di confronto. ....	169
Figura 4.29 - Scarti fra i valori di picco rilevati dagli accelerometri e la media delle rilevazioni degli accelerometri di confronto in funzione della media stessa. ....	169
Figura 4.30 – Accelerazioni massime in funzione degli effetti lesivi (fonte Cestar Italia 2000).....	170
Figura 5.1 – Muscoli monitorati con l’elettromiografia di superficie. ....	175
Figura 5.2 – Strumentazione per l’acquisizione dell’attività muscolare mediante EMG. ....	176
Figura 5.3 – Percorso effettuato nel comune di Sesto Fiorentino per le prove di guida con volontari. ....	177
Figura 5.4 – BE-Micro. ....	178
Figura 5.5 - Layout del software Galileo.....	178
Figura 5.6 – Campo prove di crash test di Sesto Fiorentino: elastico impiegato per azionare il veicolo tamponante collegato ad un estremo ad una barra in acciaio solidale al terreno e dall’altro, mediante cavo di acciaio, alla parte frontale del veicolo da movimentare. ....	180
Figura 5.7 – Dettaglio sul gancio posto nella parte posteriore del veicolo da movimentare (veicolo tamponante). Il cavo in acciaio, recuperato da un verricello elettrico, traina in dietro l’auto mettendo in trazione gli elastici. ....	181

Figura 5.8 – Vista dall’alto del campo prove: in primo piano il veicolo tamponato (Fiat Punto) e in secondo il veicolo tamponante (Opel Corsa).....	182
Figura 5.9 - Accelerometro installato in prossimità del centro di massa del veicolo tamponato.....	183
Figura 5.10 – Sistema di fotocellule per il rilievo della velocità di tamponamento della macchina tamponante. ....	183
Figura 5.11 – Posizionamento della telecamera ad alta velocità. ....	184
Figura 5.12 - Leggero casco di plastica strumentato. ....	184
Figura 5.13 – Prova con soggetto consapevole dell’impatto: TMSV. ....	185
Figura 5.14 - Prova con soggetto non consapevole dell’impatto: RMSV. ....	186
Figura 5.15 – Layout del software Galileo. ....	188
Figura 5.16 – Attivazione muscolare: la banda viola verticale rappresenta un istante in cui il volontario è rilassato.....	188
Figura 5.17 – Pannello dei risultati in LabView. ....	189
Figura 5.18 – Segnali di due muscoli differenti: in rosso lo stato rilassato, in grigio lo stato di attivazione in esame. ....	190
Figura 5.19 - Interfaccia grafica QStarz PC Suite. ....	191
Figura 5.20 – Immagini estratte dal video ad alta velocità per analisi del comportamento dell’occupante durante il tamponamento. ....	192
Figura 5.21 – Attivazione muscolare media normalizzata del volontario ID H durante la guida normale. ....	193
Figura 5.22 - Attivazione muscolare media normalizzata del volontario ID H durante la frenata. ....	193
Figura 5.23 – Attivazione muscolare normalizzata media del volontario ID G. ....	194
Figura 5.24 - Attivazione muscolare normalizzata, calcolata come media dei soli muscoli del collo, per ciascun soggetto. ....	195
Figura 5.25 – Rapporto tra lo stato di attivazione muscolare nella frenata decisa e quello nella guida normale per ciascun soggetto (escluso il volontario ID D). ....	196
Figura 5.26 – Intensità di attivazione muscolare in funzione della velocità di marcia per il volontario ID C nelle curve a destra e sinistra. ....	197
Figura 5.27 – Attivazione muscolare nelle prove di tamponamento per il volontario ID A. ....	201
Figura 5.28 – Attivazione muscolare media dei muscoli del collo per ciascun volontario nelle prove TMSV e RMSV. ....	201
Figura 5.29 - Area della coda destra compresa tra 0,075 e 0,05.....	202
Figura 5.30 – Posizione pre-urto del volontario ID I al quale era stato chiesto di assumere una postura irrigidita. ....	203

Figura 5.31 - Confronto tra i livelli di attivazione muscolare nelle fasi di guida analizzate e i livelli di attivazione muscolare nei casi di tamponamento TMSV e RMSV.....	204
Figura 5.32 – Valore di $k$ in funzione dell’accelerazione dell’auto per il volontario ID G. ....	207
Figura 5.33 - Accelerazione longitudinale della testa e del veicolo del soggetto ID I consapevole e deliberatamente teso. ....	208
Figura 5.34 - Accelerazione longitudinale della testa e del veicolo del soggetto ID I inconsapevole. ....	209
Figura 5.35 - spostamento relativo ( $\Delta s$ ) tra auto e testa in funzione del tempo.....	210
Figura 5.36 - spostamento relativo ( $\Delta s$ ) tra auto e testa in funzione del tempo per il volontario ID I. ....	211



## 8 Indice delle tabelle

Tabella 2.1 – crash test tra scooter e barriera rigida. ....	50
Tabella 2.2 – crash test tra moto e barriera rigida. ....	51
Tabella 2.3 - Crash test tra motoveicoli e barriera rigida condotti. ....	69
Tabella 2.4 – Prove di letteratura e condotte all’Università di Firenze con le quali è stato costruito il diagramma di figura 2.37. ....	75
Tabella 2.5 – Prove condotte tra moto e barriera con l’ausilio della barriera strumentata. ....	85
Tabella 2.6 – Prove condotte tra auto e moto senza dummy. ....	87
Tabella 2.7 – Dati relativi alla prova ID 1. ....	88
Tabella 2.8 – Dati relativi alla prova ID 2. ....	90
Tabella 2.9 – Dati relativi alla prova ID 3. ....	92
Tabella 2.10 – Dati relativi alla prova ID 4. ....	94
Tabella 2.11 – Dati relativi alla prova ID 5. ....	96
Tabella 2.12 – Dati relativi alla prova ID 6. ....	97
Tabella 2.13 – Riepilogo delle prove sperimentali condotte tra auto e moto senza motociclista. ....	99
Tabella 2.14 – Energia cinetica dissipata nei test condotti. ....	99
Tabella 2.15 – Confronto tra l’energia realmente dissipata ( $E_d$ ) e quella stimata. ....	100
Tabella 2.16 – Errore assoluto e percentuale commesso nella stima dell’energia cinetica dissipata. ....	101
Tabella 3.1 – Estratto della matrice 350 x 10 ottenuta dalla simulazione in LabView dei 350 impatti. ....	113
Tabella 3.2 – Prove sperimentali condotte per la validazione della (3.17) .....	118
Tabella 3.3 – Dati relativi alla prova ID 1. ....	118
Tabella 3.4 – Dati relativi alla prova ID 2. ....	120
Tabella 3.5 – Dati relativi alla prova ID 3. ....	121
Tabella 3.6 – Dati relativi alla prova ID 4. ....	123
Tabella 3.7 – Dati relativi alla prova ID 5. ....	124

Tabella 3.8 – Dati relativi alla prova ID 6.....	125
Tabella 3.9 – $V_R$ stimata con la (3.17): errore assoluto e percentuale. .	127
Tabella 3.10 – $V_R$ stimate con la (3.15) e la (3.17) per i 6 test effettuati, valutando l'energia dissipata col modello semi-empirico illustrato nel capitolo precedente.....	128
Tabella 3.11 – Test di letteratura utilizzati per verifica della formulazione proposta per il calcolo della $V_R$ con tre corpi.....	130
Tabella 3.12 – Errore assoluto commesso nei test di letteratura applicando la (3.1) e la (3.17).....	131
Tabella 4.1 – Variazione della velocità dell'auto tamponata in funzione della percentuale di overlap. ....	148
Tabella 4.2 - Accelerometro A .....	160
Tabella 4.3 – Accelerometro B.....	160
Tabella 4.4 – Accelerometro C.....	160
Tabella 4.5 – Accelerometro D. ....	161
Tabella 4.6 – Accelerometro E. ....	161
Tabella 4.7 - Riepilogo delle prove effettuate.....	162
Tabella 4.8 – Riepilogo prova numero 3. ....	162
Tabella 4.9 - Confronto in termini di accelerazioni longitudinali di picco fra accelerometri Clearbox e accelerometri di confronto, Fiat Punto I. ....	168
Tabella 5.1 – Volontari che hanno partecipato alla sperimentazione...	174
Tabella 5.2 – Prove di tamponamento su volontari condotte. ....	186
Tabella 5.3 – Attività muscolare in funzione della velocità di marcia nelle curve a destra e a sinistra per il volontario ID C. ....	196
Tabella 5.4 – Attivazione muscolare dei muscoli del collo nelle varie fasi di guida per il volontario ID G alla guida della Citroen C5.....	198
Tabella 5.5 - Attivazione muscolare dei muscoli del collo nelle varie fasi di guida per il volontario ID G alla guida della Renault Modus. ....	199
Tabella 5.6 – Confronto per il soggetto ID G. ....	199
Tabella 5.7 - Confronto per il soggetto ID H.....	199
Tabella 5.8 – Stato di attivazione muscolare normalizzato per il volontario ID E nelle 4 prove di tamponamento. ....	200
Tabella 5.9 – Analisi con la t di Student per le prove TMSV e RMSV.....	202
Tabella 5.10 – Confronto tra le medie con t di Student. ....	205
Tabella 5.11 – Accelerazioni massime testa e auto per il volontario ID I. ....	208

## 9 Bibliografia

[1] Reiss M. L., W. G. Berger, G. R. Valette, "Analysis of Motorcycle Accident Reports and Statistics", Biotechnology, Inc., Falls Church, VA, 1974.

[2] Hurt H.H. Jr. and DuPont C.J., 1977, "Human Factors in Motorcycle Accidents", 770103, Society of Automotive Engineers.

[3] McNally B. F.; Bartlett W., Motorcycle Sliding Coefficient of Friction Tests, *Accid. Reconstr. J.*, 2007, 17(2), 47–49.

[4] Lambourn R. F., The calculation of motorcycle speeds from sliding distances, SAE Paper 910125, 1991.

[5] Medwell C. J.; McCarthy J. R.; Shanahan M. T., Motor-cycle Slide to Stop Tests, SAE Paper 970963, 1983.

[6] Wood D. P.; Alliot R.; Glynn C.; et al, Confidence limits for motorcycle speed slide distance, *Journal of Auto-mobile Engineering*, Vol. 222, No. 8. (2008), pp. 1349-1361.

[7] Vangi D., Begani F., Cialdai C., Virga A., Motorcycles Slide Tests Analysis, 22nd Annual Meeting (2013), pag. 17-27.

[8] DayT. D.; Smith J. R., Friction Factors for Motorcycles Sliding on Various Surfaces, SAE Paper 840250, 1984.

[9] Searle J. A., Searle A., 1983. "The trajectories of pedestrians, motorcycles, motorcyclists, etc., following a road accident". SAE paper, 831622.

[10] Frank T.A., Smith J.W., Hansen D.C. and Werner S.M., 2008. "Motorcycle rider trajectory in pitch-over brake applications and impacts". SAE paper 2008-01-0164.

[11] Campbell K.E., Energy basis for collision severity, SAE paper 740565, Society of Automotive Engineers, Inc., Warrendale, Pennsylvania, USA (1974).

[12] Fonda A. G., Principles of crush energy determination, SAE 1999-01-0106, Society of Automotive Engineers, Inc., Warrendale, Pennsylvania, USA (1999).

[13] Tumbas N.S., Smith R.A., Measurement protocol for quantifying vehicle damage from an energy basis point of view, Tumbas and Associates - U. S. Naval Academy, SAE paper 880072, Society of Automotive Engineers, Inc., Warrendale, Pennsylvania, USA (1988).

[14] Nystrom G.A., Kost G., Werner S.M., Stiffness parameters for vehicle collision analysis, Failure Analysis Associates, Inc., SAE paper 910119, Society of Automotive Engineers, Inc., Warrendale, Pennsylvania, USA (1991).

[15] Neptune J.A., Blair G.Y., Flynn J.E., A method for quantifying vehicle crush stiffness coefficients, Blair, Church & Flynn Consulting Engineers, SAE paper 920607, Society of Automotive Engineers, Inc., Warrendale, Pennsylvania, USA (1992).

[16] Zeidler F., Schreier H.H., Stadelmann R., Accident research and accident reconstruction by the EES-accident reconstruction method, SAE paper 850256, Society of Automotive Engineers, Inc., Warrendale, Pennsylvania, USA (1985).

[17] Schreier H.H., Nelson W.D., Applicability of the EES-accident reconstruction method with MacCAR©, SAE 870047, Society of Automotive Engineers, Inc., Warrendale, Pennsylvania, USA (1987).

[18] ISO 12353-1, Road Vehicles – Traffic Accident Analysis – Part 1: Vocabulary – First Edition, 2002.

[19] Severy D.M., Brink H.M., Blaisdell D.M., Motorcycle collision experiments., Proceedings of the fourteenth Stapp car crash conference. Warrendale, PA: Society of Automotive Engineers; 1970.



[20] Kasanicky G., et al., Analysis of single-track vehicle accidents, University publishers Zilina (2003).

[21] Adamson K. S., et Alii. Seventeen motorcycle crash tests into vehicles and a barrier, SAE 2002-01-0551, Society of Automotive Engineers, Inc., Warrendale, Pennsylvania, USA (2002).

[22] Priester J., Weyde M., Tests carried out in Berlin. CD-ROM, Ingenieur- und Kfz-Sachverständigenbüro Priester und Weyde, Saarbrücken, Berlin (2005).

[23] Wood D. P., Glynn C., Walsh D., Motorcycle-to-car and scooter-to-car collisions: speed estimation from permanent deformation, Proc. IMechE Vol. 223 Part D: J. Automobile Engineering, PP. 738-759, DOI: 10.1243/09544070JAUTO1069 (2009).

[24] C. Cialdai, Metodo semplificato per la valutazione dell'energia di deformazione negli incidenti stradali, tesi di laurea 2010 Università degli Studi di Firenze.

[25] D. Vangi, F. Begani - Energy loss in vehicle collisions from permanent deformation: an extension of the "Triangle Method" Vehicle System Dynamic, Volume 51, Issue 6, 2013, pages 857-876.

[26] Priester J., Motorrad – Pkw – Crashversuche Versuchsreihe Juli 2000, Dokumentation der Versuche.

[27] Antonetti V.W., Estimating the coefficient of restitution of the vehicle-to-vehicle bumper impacts, SAE paper 980552, 1999

[28] W.E. McConnell, R.P. Howard, H.M. Guzman, J.B. Bomar, J.H. Raddin, J.V. Benedict, H.L. Smith, C.P.Hatsell, Analysis of Human Test Subject Kinematic Responses to Low Velocity Rear End Impacts, Sae Technical Paper 930889, 1993

[29] Bostrom 2000 Boström O, Håland Y, Lövsund L and Svenssom MY (2000). Neck injury criterion (NIC) and its relevance to various possible neck injury mechanisms. Frontiers in Whiplash Trauma. Yoganandan N and Pintar FA (Eds.). IOS Press, The Netherlands, ISBN 1 58603 012 4

[30] Eichberger A., et al., "Pressure measurements in the spinal canal of post-mortem human subjects during rear-end impact and correlation of results to the neck injury criterion", *Accident Analysis and Prevention*, 32, pagg.251-260, 2000

[31] Wheeler, et al., "Evolution of The Applicability of the Neck Injury Criterion (NIC) in Rear End Impacts on the Basis of Human Subject in Rear-end Collisions", *IRCOBI Conference*, Goteborg, 1999

[32] Ono.K, et al ; 'Cervical Injury Mechanism Based on the Analysis of Human Cervical Vertebral Motion and Head-Neck-Torso Kinematics During Low Speed Rear Impacts', *The 41st STAPP Car Crash Conference*, Florida, 1997

[33] Boström O., et al., "Comparison of car seats in low speed rear-end impacts using the BioRID II dummy and the new neck injury criterion (NIC)", *Accident Analysis and Prevention*, vol.32, 321-328, 2000

[34] Eichberger A., Geigl B., Moser A., et al., Comparison of different car seats regarding head-neck kinematics of volunteers during rear-end impact. *International IRCOBI Conference*, Dublin, Ireland. IRCOBI, 153-164 (1996).

[35] Rayan G. A., Taylor G. W., Moore V. M., Strain in car occupants: the influence of car related factors on initial severity. *Medical Journal of Australia*, 159: 651-656 (1993).

[36] Krafft M., No fatal injuries to car occupants, PhD thesis, Folksam research 10660 Stockholm Sweden (1998).

[37] Kuppas S. et al., Performance of Head Restraints as a Function of Seat Back Strength in Rear Impact Sled Tests, *NHTSA 2002*, from [www.nhtsa.dot.gov](http://www.nhtsa.dot.gov).

[38] Hell W., Langwieder K., et al., Consequences for seat design due to rear-end accident analysis, sled tests and possible test criteria for reducing cervical spine injuries after rear-end collision, *International IRCOBI Conference*, Sitges, Spain. IRCOBI, 243-260 (1999).

[39] Parkin S., Mackay M. et al., Rear-end collision and seat performance to yield or not yield. *Association for the advancement of Automotive Medicine Conference*, Chicago, USA, 231-244 (1995).

[40] L. Bartolozzi: Analisi della caratteristica forza-deformazione nelle prove di crash al variare dell'overlap, tesi di laurea 2010 Università degli Studi di Firenze.

[41] A. Moser , H. Steffan , M. Avery , M. Mackay , A. Weekes, WITkit – Whiplash Injury Risk Claims, Methodology and Theory of Operation, 20. EVU Annual Meeting Graz 2011, 53-62 (2011).

[42] M. Avery, A. Weekes, The influence of crash characteristics on whiplash injury risk, Whiplash 2010 Neck Pain in Car Crashes, International Conference, Munich Germany (2010).

[43] Berglund A., On associations between different factors and whiplash injury, PhD thesis, Karolinska Institute, Stockholm Sweden (2002).

[44] Braun T. A., Jhoun J. H., Braun M. J., Wong B. M., Boster T. A., Kobayashi T. M., Perez F. A., Hesler G. M., Rear-end impact testing with human test subjects. SAE Paper No. 2001-01-0168 (2001).

[45] McConnell W. E., Howard R. P., Guzman H. M., Bomar J. B., Raddin J. H., Benedict J. V., Smith H. L., Hatsell C. P., Analysis of Human test subject kinematic responses to low speed rear end impacts. SAE Paper No. 930889 (1993).

[46] Welcher J. B., Szabo T. J., Voss D. P., Human occupant motion in rear-end impacts: effects of incremental increases in velocity change. SAE Paper No. 2001-01-0899 (2001).

[47] J. S. Blouin, J. T. Inglis, G. P. Siegmund, Startle responses elicited by whiplash perturbations, *The Journal of Physiology*, Volume 573, Issue 3, pages 857–867, June 2006

[48] Viano D C. Seat Design Principles to Reduce Neck Injuries in Rear Impacts. *Traffic Injury Prevention*, 9:552-560,2008.

[49] D. Vangi, Ricostruzione della dinamica degli incidenti stradali: principi e applicazioni, Firenze University Press 2008.

[50] T.J. Szabo, J.B. Welcher, R.D. Anderson, M.M. Rice, J. A. Ward, L.R. Paulo, N. J. Carpenter, Human occupant Kinematic Response to Low Speed Rear-End Impacts, Sae Technical Paper 940532, 1994

[51] Siegmund G. P., Sanderson D. J., Myers B. S., Inglis J. T., Rapid neck muscle adaptation alters the head kinematics of aware and unaware subjects undergoing multiple whiplash-like perturbations. *Journal of Biomechanics* 36 (2003) 473–482.

[52] Kumar S., Ferrari R., Narayan Y., Kinematic and electromyographic response to whiplash loading in lowvelocity whiplash impacts—a review. *Clinical Biomechanics* 20 (2005) 343–356.

[53] Welcher J. B., Szabo T. J., Voss D. P., Human occupant motion in rear-end impacts: effects of incremental increases in velocity change. *SAE Paper No. 2001-01-0899* (2001).

[54] Kumar S., Narayan Y., Amell T., Role of awareness in head-neck acceleration in low velocity rear-end impacts. *Accident Analysis and Prevention* 32 (2000) 233–241.

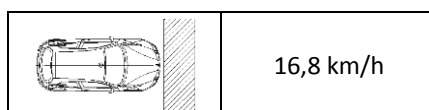
[55] G.Shmidt, Zur Biomechanik des Schleudertraumas der Halswirbelsaule, *Versicherungsmedizin* 1989 Jul 1, VOL: 41 (4), P: 121-6.

[56] W.E. McConnell et al., Analysis of Human Test Subject Kinematic Responses to Low Velocity Rear End Impact, *SAE paper 930889*.

# Appendice A

Nell'appendice A sono riportati i risultati delle prove di caratterizzazione delle scatole nere Clearbox prodotte da Octotelematics. Nei grafici e nelle tabelle che seguono vengono riportati per confronto i valori accelerometrici misurati da tutti gli accelerometri in direzione longitudinale.

## Prova 1

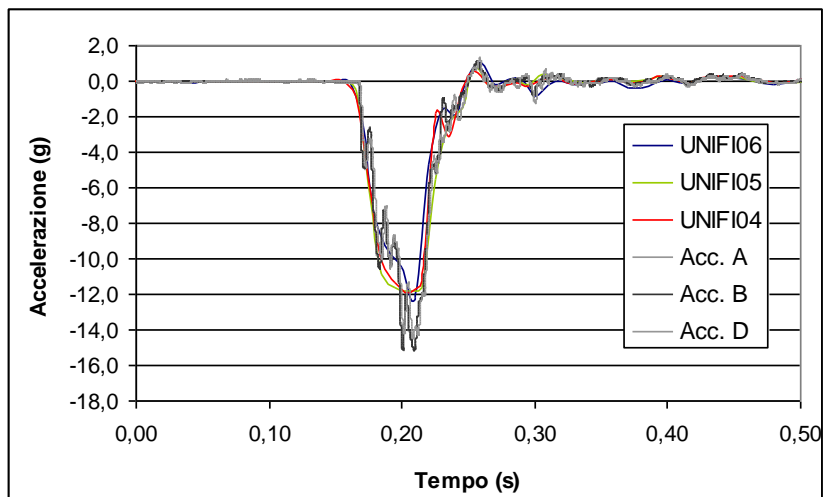


Accelerometri Clearbox:

- Accelerometro Clearbox UNIFI04
- Accelerometro Clearbox UNIFI05
- Accelerometro Clearbox UNIFI06

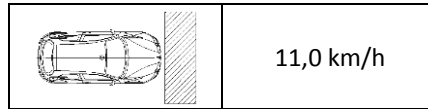
Accelerometri di confronto:

- Accelerometro A
- Accelerometro B
- Accelerometro D



	Accelerometro	Acc. di picco (g)	
Acc. di confronto	A	-15,12	Diff. dalla media degli acc. di confronto
	B	-15,16	
	D	-14,46	
	media	-14,91	
	scarto max	0,45	
Acc. Clearbox	UNIFI04	-11,93	-2,98
	UNIFI05	-11,86	-3,06
	UNIFI06	-12,18	-2,74

## Prova 2

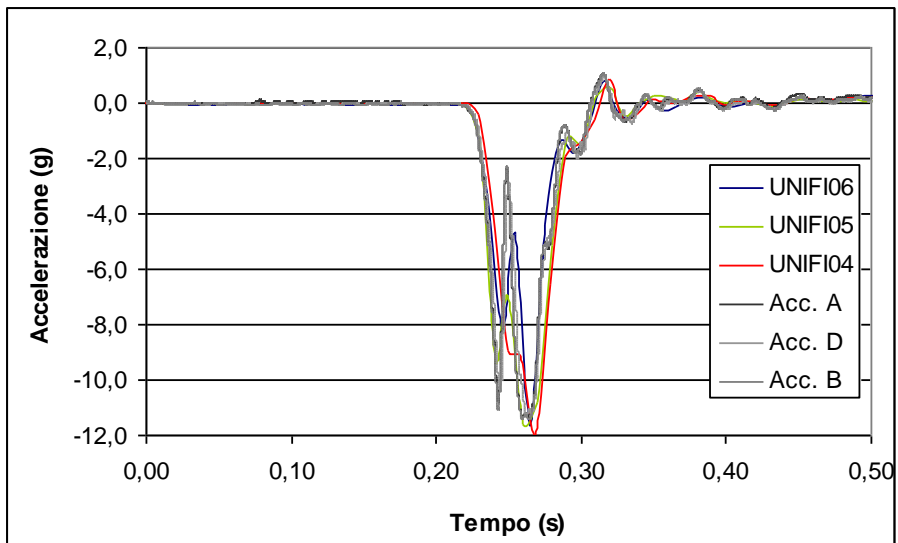


Accelerometri Clearbox:

- Accelerometro Clearbox UNIFI04
- Accelerometro Clearbox UNIFI05
- Accelerometro Clearbox UNIFI06

Accelerometri di confronto:

- Accelerometro A
- Accelerometro B
- Accelerometro D



	Accelerometro	Acc. di picco (g)	
Acc. di confronto	A	-11,35	Diff. dalla media degli acc. di confronto
	B	-11,42	
	D	-11,30	
	media	-11,36	
	scarto max	0,05	
Acc. Clearbox	UNIFI04	-12,03	0,67
	UNIFI05	-11,62	0,26
	UNIFI06	-11,68	0,33

### **Prova 3**

	8,3 km/h
---	----------

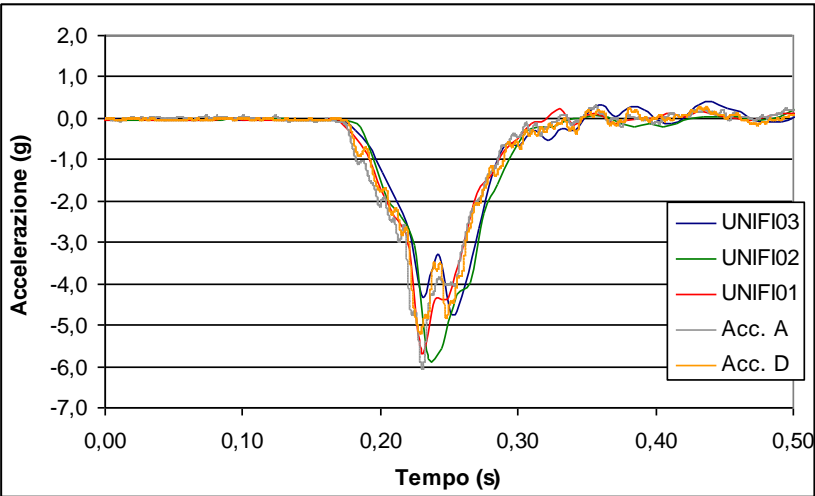
Accelerometri Clearbox:

- Accelerometro Clearbox UNIFI01
- Accelerometro Clearbox UNIFI02
- Accelerometro Clearbox UNIFI03

Accelerometri di confronto:

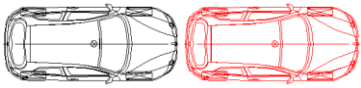
- Accelerometro A
- Accelerometro D





	Accelerometro	Acc. di picco (g)	
Acc. di confronto	A	-6,06	Diff. dalla media degli acc. di confronto
	C	-5,22	
	media	-5,64	
	scarto max	0,42	
Acc. Clearbox	UNIFI01	-5,63	-0,01
	UNIFI02	-5,81	0,17
	UNIFI03	-4,76	-0,88

**Prova 4**

	16,0 km/h
---	-----------

Accelerometri Clearbox Renault Clio II:

- Accelerometro Clearbox UNIFI04
- Accelerometro Clearbox UNIFI05
- Accelerometro Clearbox UNIFI06

Accelerometri di confronto Renault Clio II:

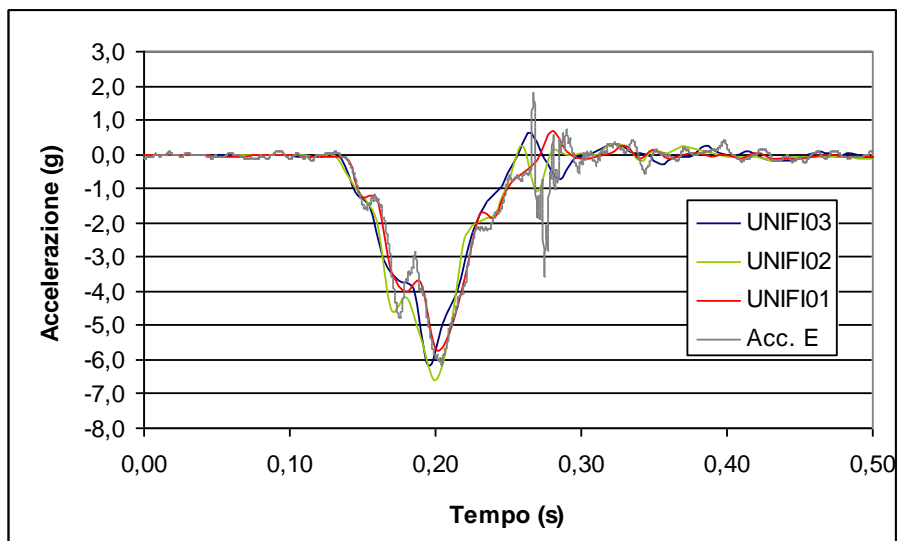
- Accelerometro A
- Accelerometro B
- Accelerometro D

Accelerometri Clearbox Fiat Punto I:

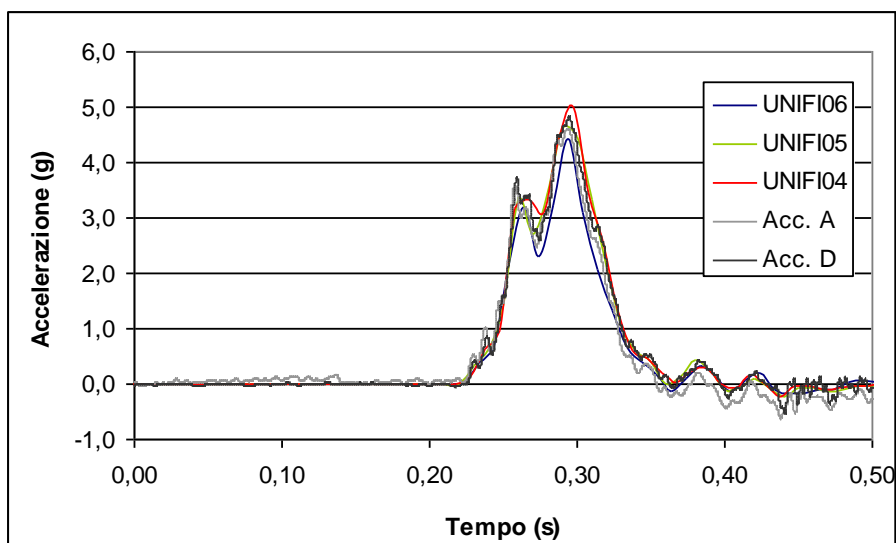
- Accelerometro Clearbox UNIFI01
- Accelerometro Clearbox UNIFI02
- Accelerometro Clearbox UNIFI03

Accelerometri di confronto Fiat Punto I:

- Accelerometro C
- Accelerometro E

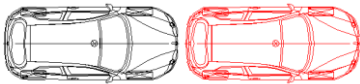


	Accelerometro	Acc. di picco (g)	
Acc. di confronto	C	-5,99	Diff. dalla media degli acc. di confronto
	E	-6,15	
	media	-6,07	
	scarto max	0,08	
Acc. Clearbox	UNIFI01	-5,66	-0,41
	UNIFI02	-6,59	0,52
	UNIFI03	-6,16	0,10



	Accelerometro	Acc. di picco (g)	
Acc. di confronto	A	4,62	Diff. dalla media degli acc. di confronto
	B	4,87	
	D	4,84	
	media	4,78	
	scarto max	0,10	
Acc. Clearbox	UNIFI04	4,99	-0,21
	UNIFI05	4,65	0,13
	UNIFI06	4,44	0,34

### **Prova 5**

	20,9 km/h
---	-----------

Accelerometri Clearbox Renault Clio II:

- Accelerometro Clearbox UNIFI04
- Accelerometro Clearbox UNIFI05
- Accelerometro Clearbox UNIFI06

Accelerometri di confronto Renault Clio II:

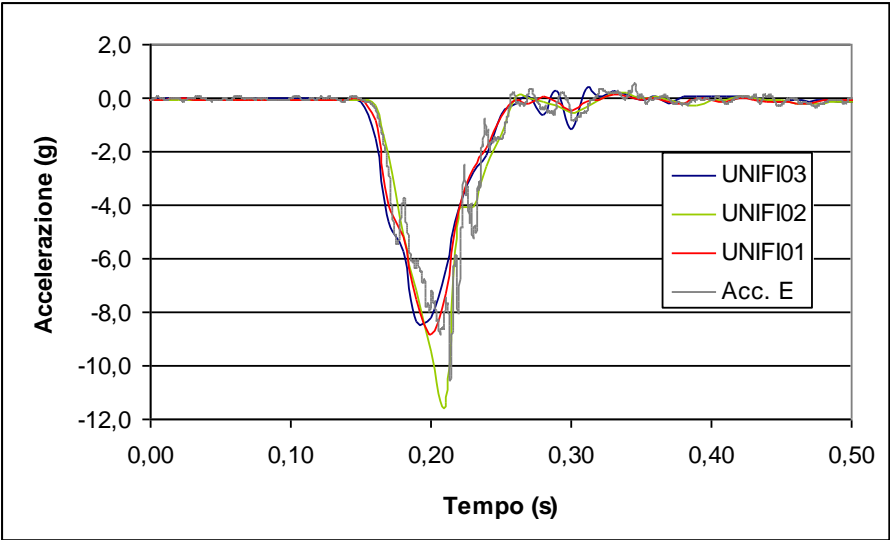
- Accelerometro A
- Accelerometro B
- Accelerometro D

Accelerometri Clearbox Fiat Punto I:

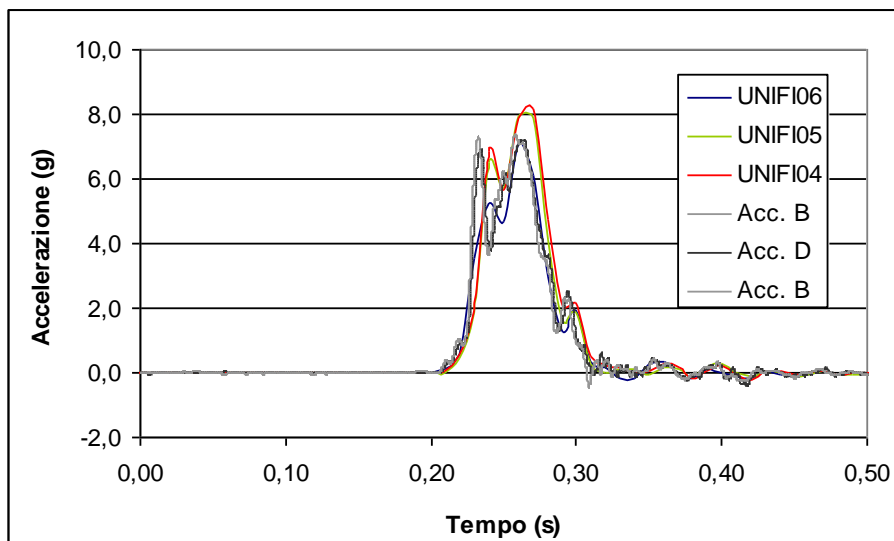
- Accelerometro Clearbox UNIFI01
- Accelerometro Clearbox UNIFI02
- Accelerometro Clearbox UNIFI03

Accelerometri di confronto Fiat Punto I:

- Accelerometro E



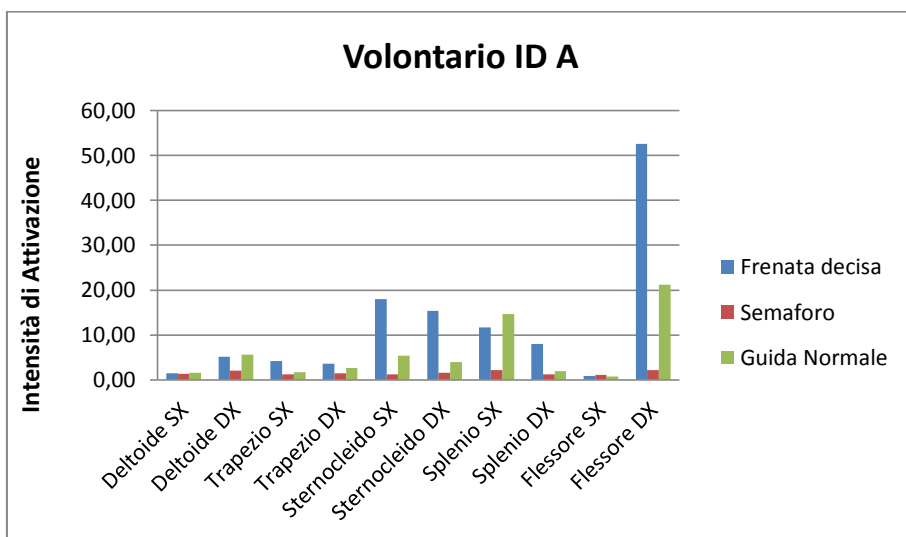
	Accelerometro	Acc. di picco (g)	
Acc. di confronto	E	-10,56	Diff. dalla media degli acc. di confronto
	n.a.	n.a.	
	media	n.a.	
	scarto max	n.a.	
Acc. Clearbox	UNIFI01	-8,86	-1,70
	UNIFI02	-11,40	0,85
	UNIFI03	-8,34	-2,21

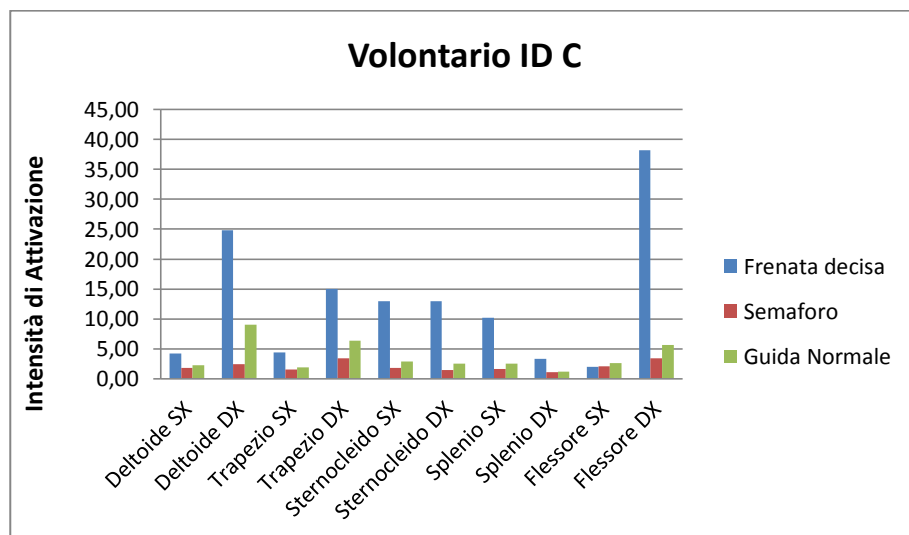
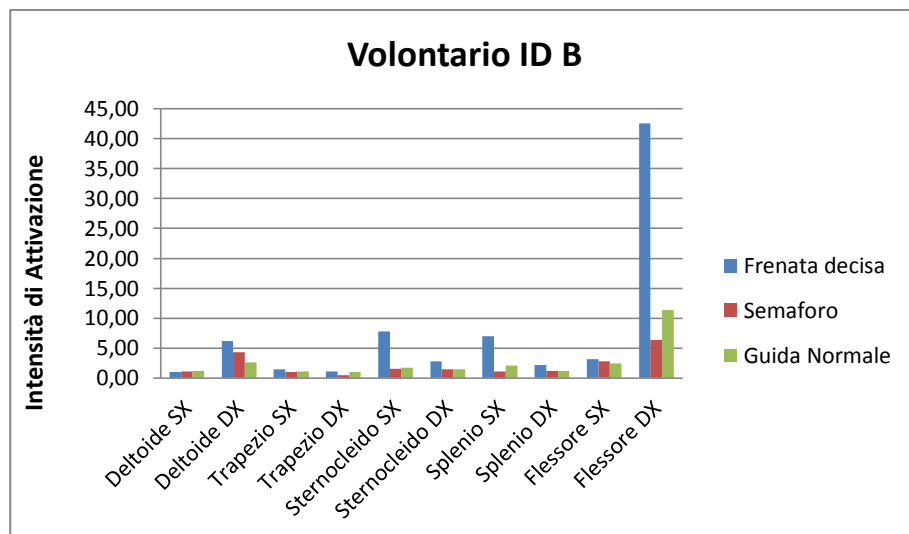


	Accelerometro	Acc. di picco (g)	
Acc. di confronto	A	7,27	Diff. dalla media degli acc. di confronto
	B	7,36	
	D	7,20	
	media	7,28	
	scarto max	0,08	
Acc. Clearbox	UNIFI04	8,20	-0,92
	UNIFI05	7,94	-0,66
	UNIFI06	7,09	0,19

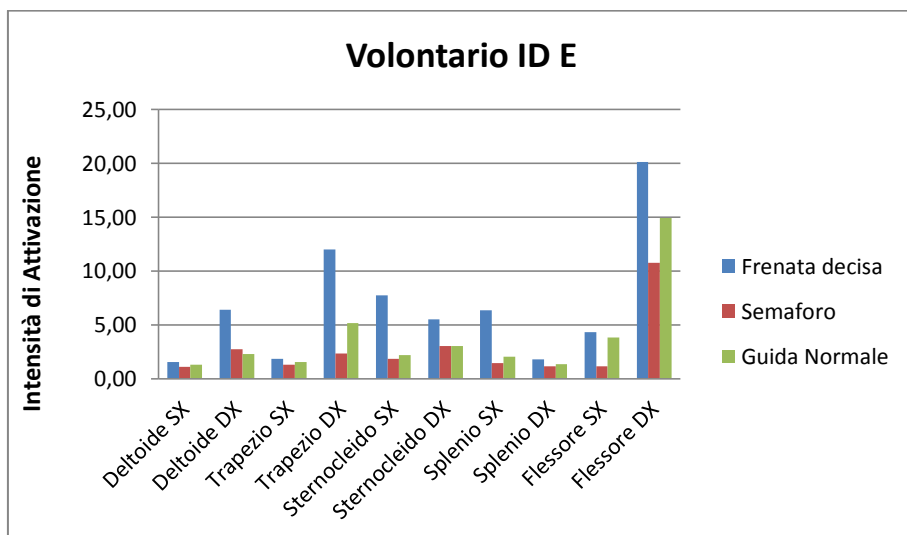
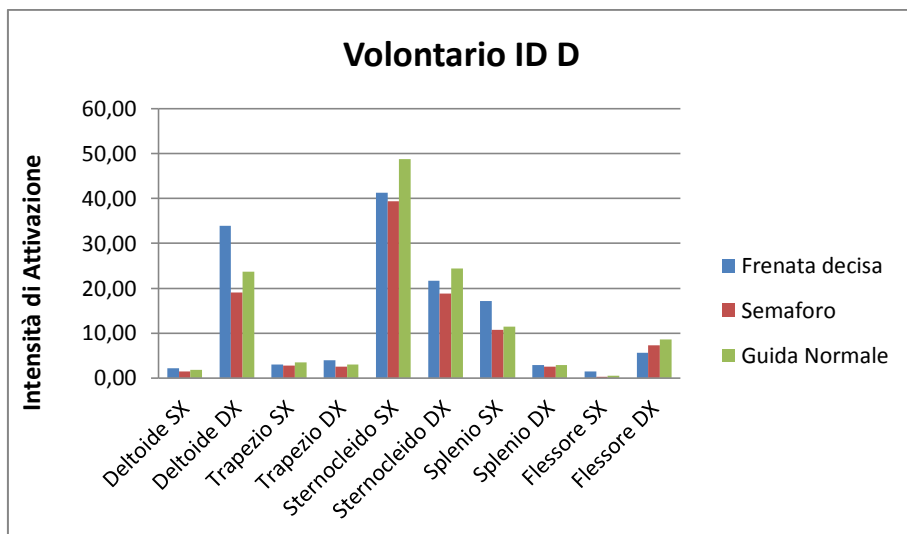
## Appendice B

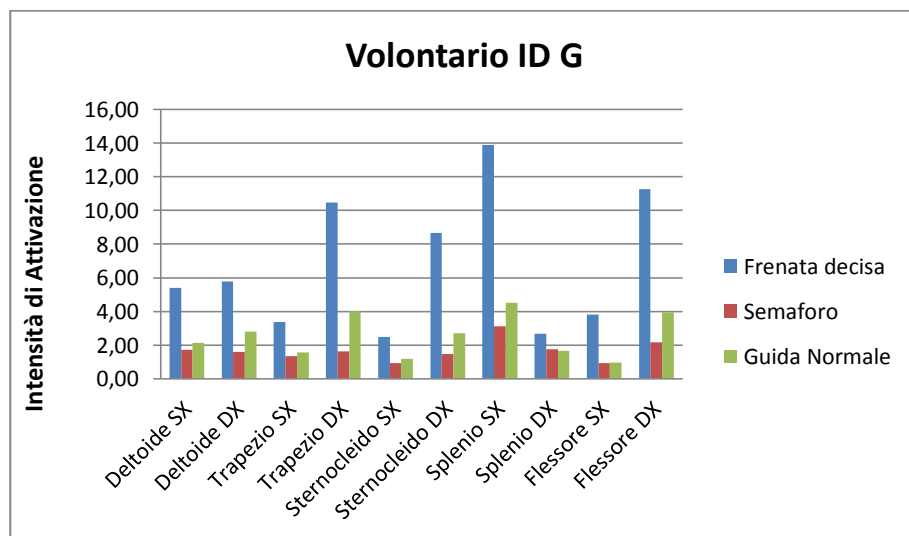
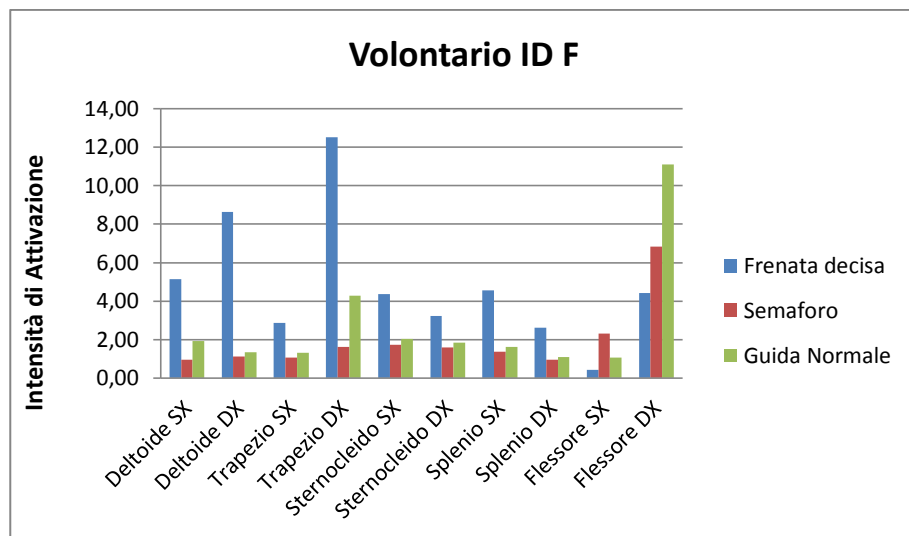
Nell'appendice B sono riportati, per ciascun volontario, gli stati di attivazione muscolare delle fasi analizzate durante le prove di guida (Frenata decisa, Attesa al semaforo e Guida normale) dei muscoli monitorati con l'elettromiografia di superficie.

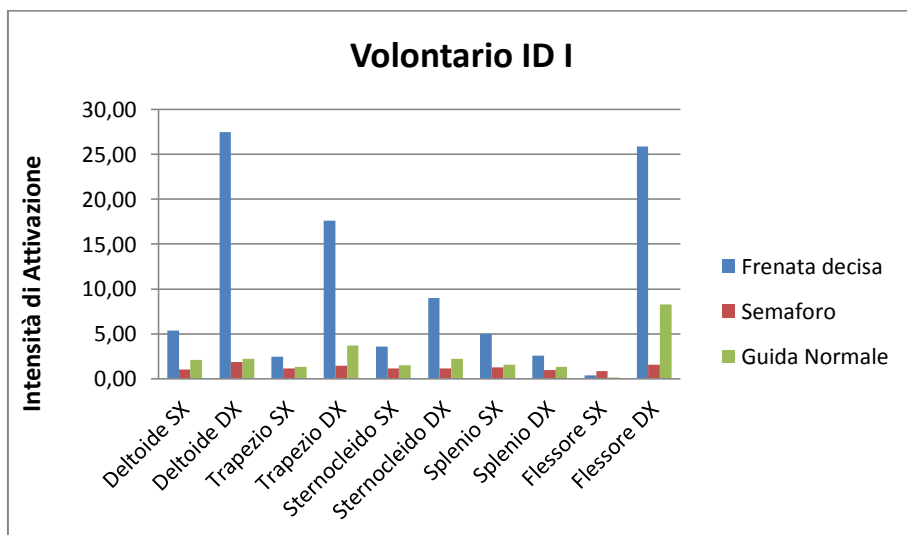
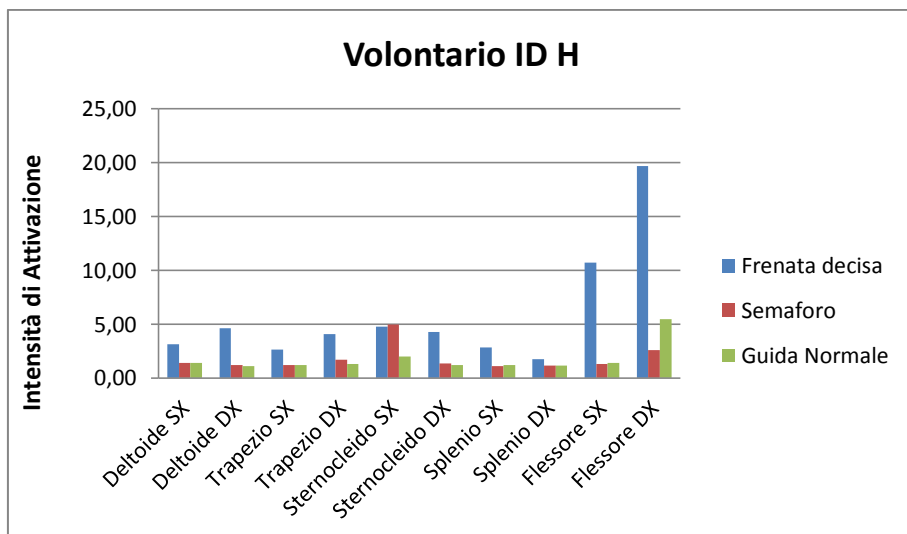








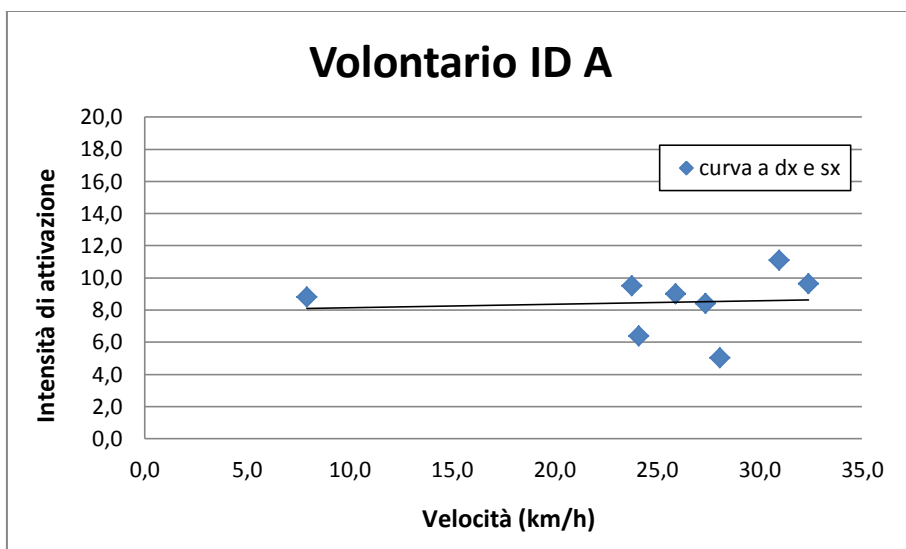


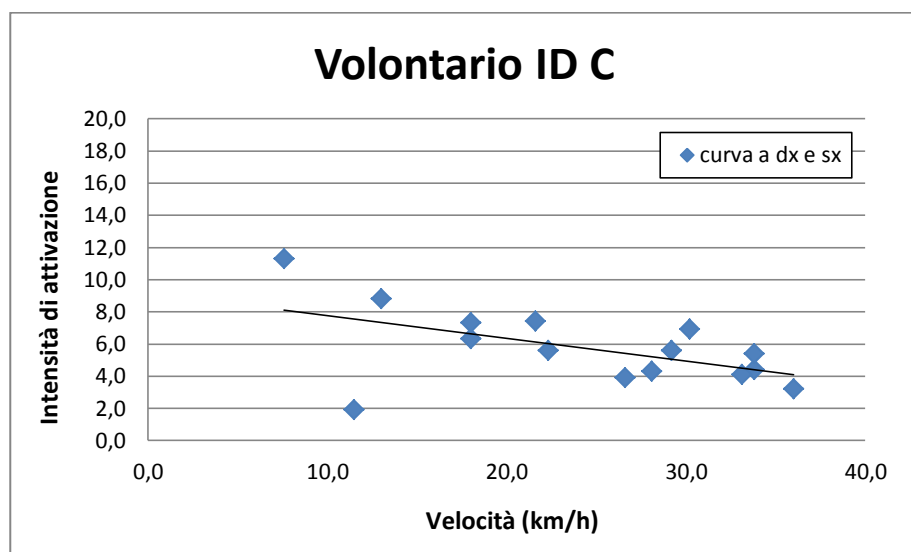
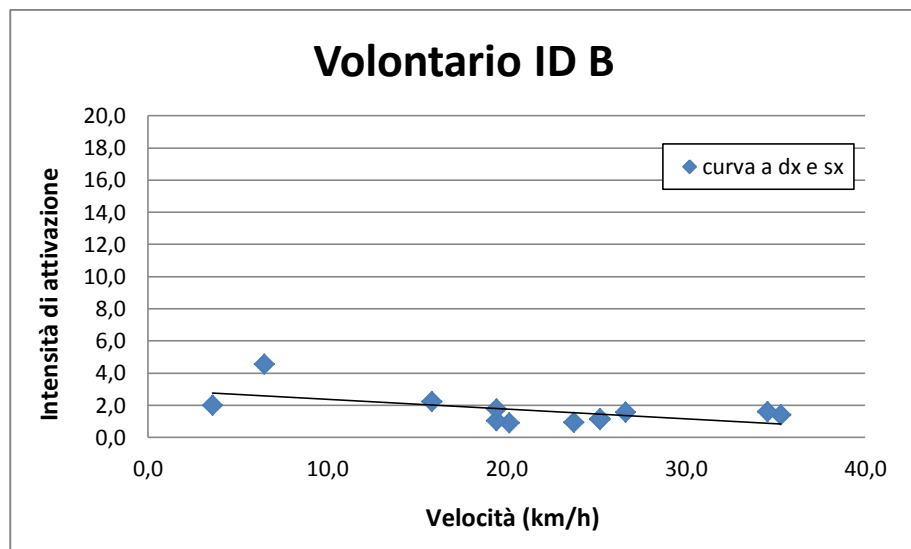


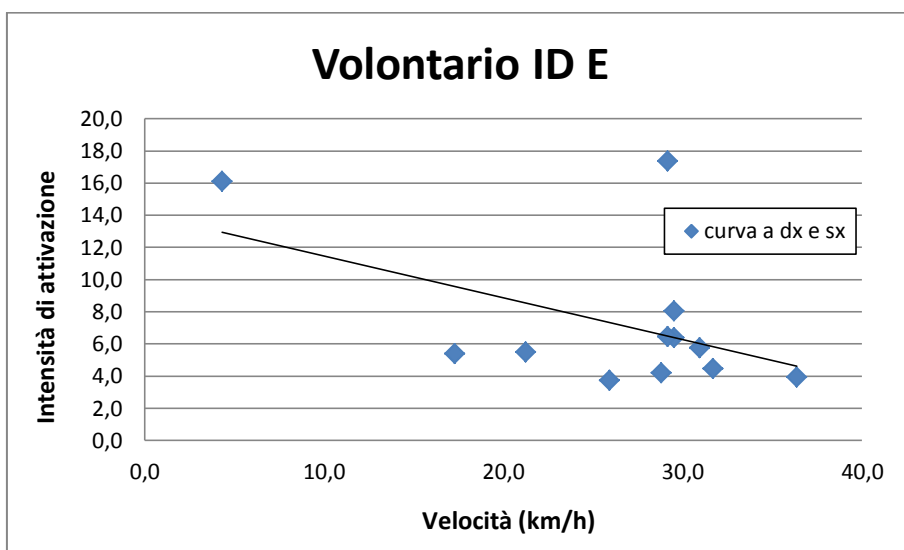
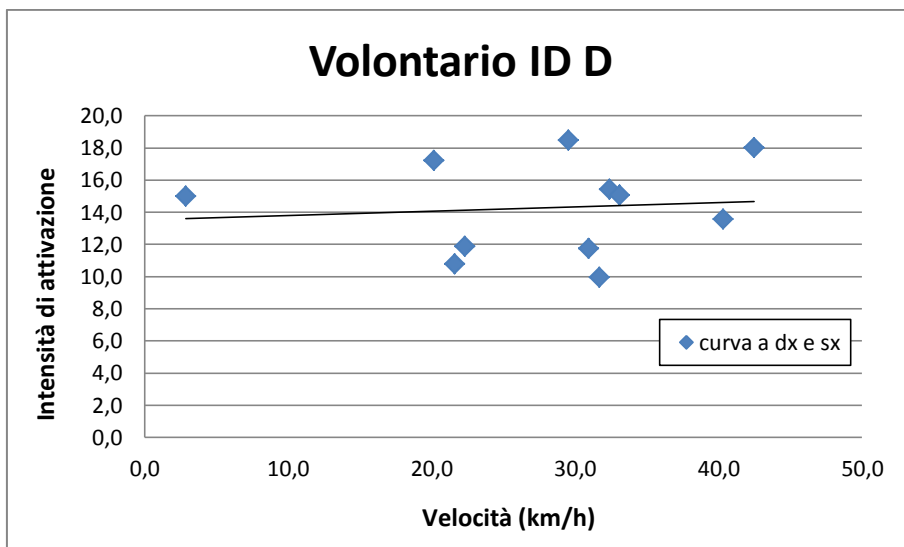


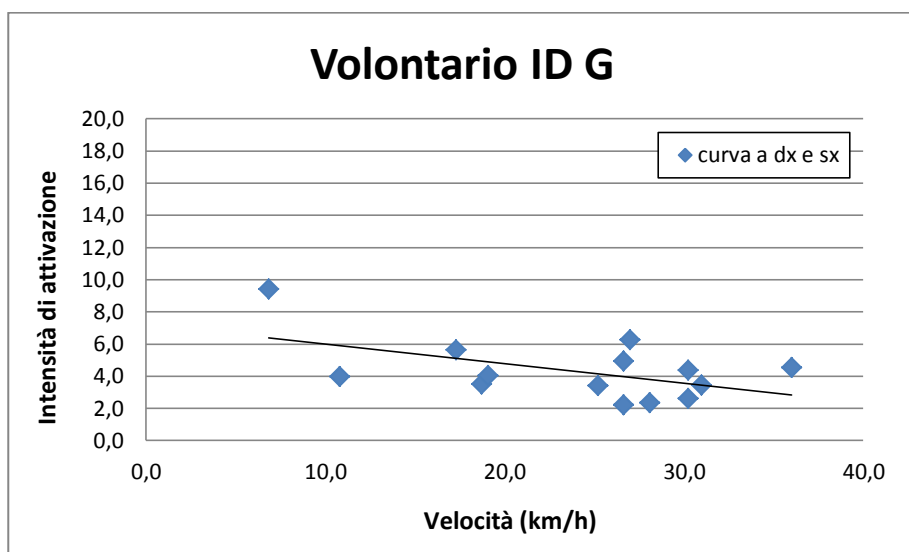
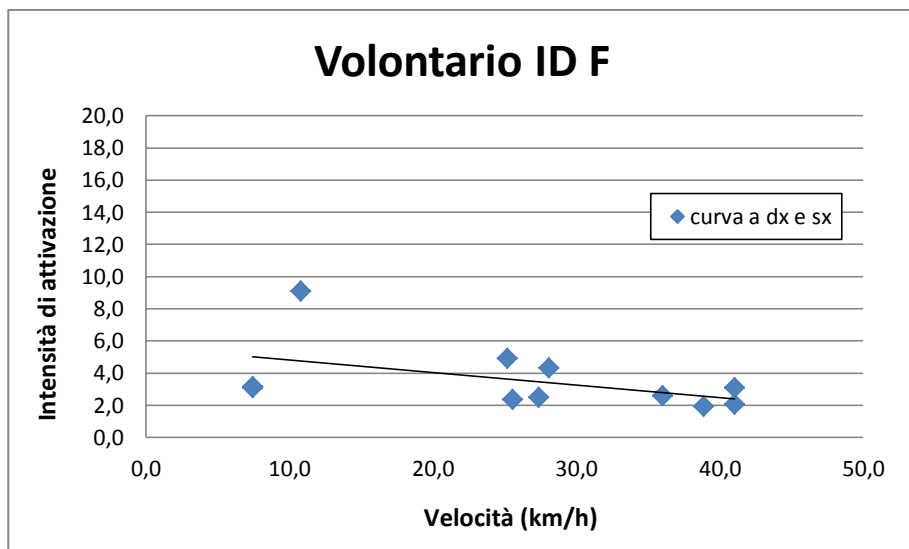
## Appendice C

Nell'appendice C vengono riportati per ciascun volontario le correlazioni tra le velocità di guida e l'intensità di attivazione muscolare durante le curve a destra e sinistra.

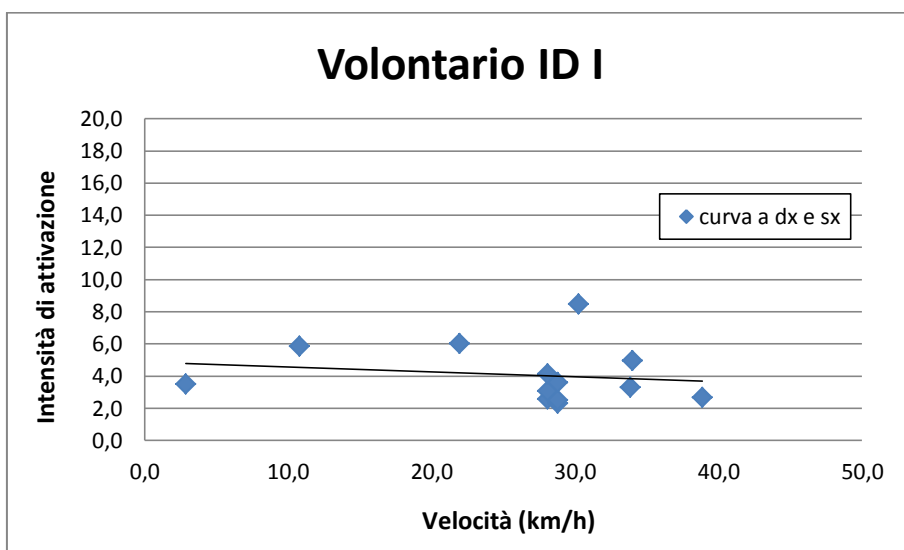
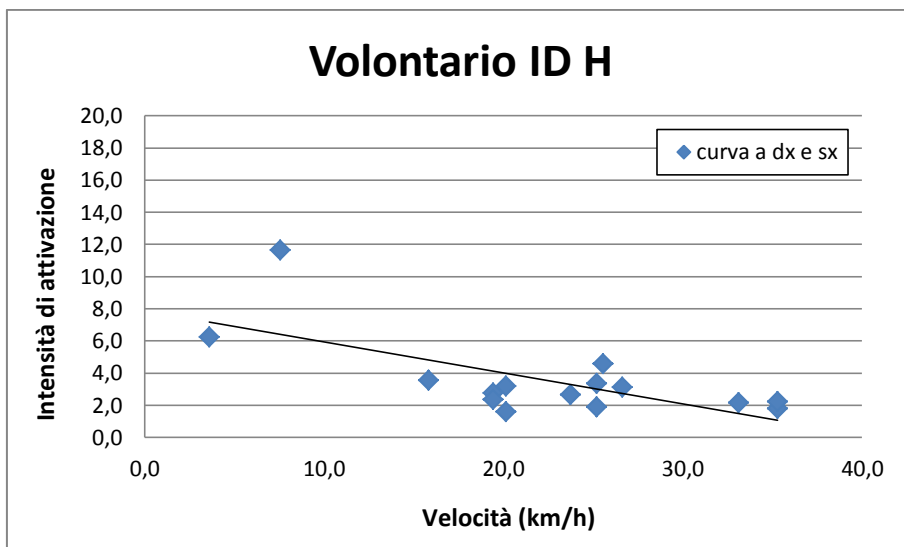














## Appendice D

Nell'appendice D vengono riportati, per ciascun volontario, i grafici relativi al fattore  $k$  (definito come il rapporto tra l'accelerazione massima della testa e quella dell'auto) in funzione dell'accelerazione subita dall'auto tamponata.

